UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DINÂMICA DA COBERTURA VEGETAL APÓS QUEIMA ACIDENTAL EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHO

GLEICE APARECIDA CABREIRA PADILHA

Dourados – MS
2026

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DINÂMICA DA COBERTURA VEGETAL APÓS QUEIMA ACIDENTAL EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHO

GLEICE APARECIDA CABREIRA PADILHA

Orientador: Prof. Dr. Adriano Bicioni Pacheco

Coorientadora: Profª. Drª. Elaine Reis Pinheiro Lourente

Dissertação apresentada á Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

Dourados – MS
2026

VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS DO SOLO E DINÂMICA DA COBERTURA VEGETAL APÓS QUEIMA ACIDENTAL EM ÁREA DE SUCESSÃO SOJA-MILHO

por

GLEICE APARECIDA CABREIRA PADILHA

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA.

Aprovado em: __04__/__08__/__2026____

Documento assinado digitalmente
gov.br
ADRIANO BICIONI PACHECO
Data: 26/10/2026 11:02:58-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. Adriano Bicioni Pacheco
Orientador – UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
gov.br
MARIANA ZAMPAR TOLEDO
Data: 27/10/2026 11:20:48-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. ª Dr ª. Mariana Zampar Toledo
Membro da Banca Examinadora – UFGD/FCA

Documento assinado digitalmente
gov.br
VALDINEY CAMBUY SIQUEIRA
Data: 27/10/2026 09:45:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____
Prof. Dr. Valdiney Cambuy Siqueira
Membro da Banca Examinadora – UFGD/FCA

RESUMO

As queimadas acidentais em áreas agrícolas podem alterar atributos químicos, físicos e biológicos do solo, comprometendo sua qualidade e a sustentabilidade dos sistemas produtivos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de uma queima acidental sobre os atributos do solo e a dinâmica da cobertura vegetal em área sob sistema plantio direto consolidado. O estudo foi conduzido no município de Dourados, Mato Grosso do Sul, em área cultivada com sucessão soja-milho há mais de 15 anos. Foram avaliados 50 pontos amostrais georreferenciados, distribuídos sistematicamente em grade regular, sendo 18 localizados na área queimada e 32 na área não queimada. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, aproximadamente 11 meses após a ocorrência da queima, para determinação dos atributos químicos, físicos e da atividade da fosfatase ácida. A variabilidade espacial dos atributos foi avaliada por meio de análise geoestatística, enquanto a dinâmica da cobertura vegetal foi investigada utilizando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obtido a partir de imagens do satélite Sentinel-2 adquiridas antes e após a queima e durante o estabelecimento da cultura subsequente. Os resultados evidenciaram poucas diferenças entre as áreas queimada e não queimada, sem alterações estatisticamente significativas nos atributos físicos avaliados. A atividade da fosfatase ácida apresentou redução numérica na área queimada, porém sem diferença estatística. A análise geoestatística revelou dependência espacial predominantemente forte a moderada para os atributos avaliados. A análise temporal do NDVI evidenciou redução da cobertura vegetal associada à queima, seguida de recuperação após o estabelecimento da cultura da soja. Conclui-se que, nas condições avaliadas, a queima acidental apresentou efeitos limitados sobre os atributos do solo 11 meses após sua ocorrência, embora tenha provocado alterações temporárias na cobertura vegetal.

Palavras-Chave: Qualidade do solo, Geoestatística, NDVI, Sistema plantio direto.

ABSTRACT

Accidental fires in agricultural areas can alter soil chemical, physical, and biological properties, potentially compromising soil quality and the sustainability of agricultural production systems. In this context, this study aimed to evaluate the effects of an accidental fire on soil properties and vegetation cover dynamics in an area under a long-term no-tillage system. The study was conducted in Dourados, Mato Grosso do Sul, Brazil, in an agricultural area under soybean–maize succession for more than 15 years. A total of 50 georeferenced sampling points were systematically distributed across a regular grid, including 18 points in the burned area and 32 in the unburned area. Soil samples were collected at depths of 0–10 and 10–20 cm approximately 11 months after the fire to determine soil chemical and physical properties and acid phosphatase activity. The spatial variability of soil properties was assessed using geostatistical analysis, while vegetation cover dynamics were evaluated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), derived from Sentinel-2 satellite imagery acquired before and after the fire and during the establishment of the subsequent crop. The results revealed few differences in soil properties between burned and unburned areas, with no statistically significant differences in the evaluated physical properties. Acid phosphatase activity showed a numerical reduction in the burned area, although this difference was not statistically significant. Geostatistical analysis revealed predominantly strong to moderate spatial dependence among the evaluated soil properties. Temporal NDVI analysis indicated a reduction in vegetation cover associated with the fire, followed by recovery after the establishment of the soybean crop. In conclusion, under the conditions evaluated, the accidental fire had limited effects on soil properties 11 months after its occurrence, although it caused temporary changes in vegetation cover.

Keywords: Soil quality; Geostatistics; NDVI; No-tillage system.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 10
2.1 Contextualização do Sistema Plantio Direto e os Efeitos do Fogo na Sucessão Soja-Milho 10
2.2 Efeitos da Queima nos Atributos Químicos do Solo 13
2.3 Efeitos da Queima nos Atributos Físicos do Solo 16
2.4 Efeitos da Queima na Microbiologia e Atividade Enzimática do Solo 17
3. MATERIAL E MÉTODOS 19
3.1 Pontos amostrais 20
3.2 Análises químicas do solo 21
3.3 Analise granulométrica 22
3.4 Argila dispersa em água e grau de floculação 22
3.5 Estabilidade de agregados e índice de estabilidade 23
3.6 Densidade do solo ..... **Error! Bookmark not defined.**
3.7 Atividade enzimatica no solo 25
3.8 Determinação do Indice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) 27
3.9 Análise Geoestatística 29
3.10 Análise estatística para atributos físicos do solo 30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
4.1 Variabilidade espacial da química do solo 31
4.2 Interpretação de resultados das análises de solo e mapas temáticos 33
4.3 Parâmetros físicos do solo 42
4.4 Parâmetro enzimático 46
4.5 Dinâmica temporal do NDVI 48
5 CONCLUSÕES 53
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 54
7 Apendice 59

1. INTRODUÇÃO

A ocorrência de queimadas em ambientes agrícolas e naturais constitui um importante fator de perturbação dos ecossistemas, especialmente em regiões sujeitas a períodos prolongados de estiagem. No Cerrado brasileiro, o fogo foi historicamente empregado durante o processo de expansão da fronteira agrícola, principalmente para limpeza de áreas, renovação de pastagens e eliminação de resíduos vegetais. Entretanto, sua ocorrência pode provocar alterações nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, cuja magnitude depende, entre outros fatores, da intensidade, duração e recorrência do fogo, da quantidade de material combustível e das características do ambiente atingido (SOUSA; LOBATO, 2004; CERTINI, 2005; AGBESHIE et al., 2022).

Além dos efeitos diretos decorrentes do aquecimento, a queima da biomassa modifica as condições da superfície do solo pela remoção parcial ou total da cobertura vegetal. A perda dessa proteção aumenta a exposição do solo à radiação solar e ao impacto direto das gotas de chuva, podendo alterar a temperatura e a umidade da camada superficial, favorecer o escoamento e a erosão e interferir nos processos de ciclagem de nutrientes. A magnitude dessas alterações depende da severidade do fogo e das condições edafoclimáticas da área afetada (CERTINI, 2005; SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014).

A remoção dos resíduos culturais pelo fogo assume particular importância em áreas manejadas sob Sistema Plantio Direto (SPD), uma vez que a manutenção da cobertura sobre a superfície constitui um componente fundamental desse sistema. O SPD baseia-se no mínimo revolvimento do solo, na manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície e na diversificação de espécies cultivadas. Esses princípios contribuem para a conservação da estrutura do solo, redução dos processos erosivos, manutenção da umidade e incremento da matéria orgânica, proporcionando condições favoráveis à conservação dos atributos edáficos (SALTON; HERNANI; FONTES, 1998; BAYER et al., 2000; DERPSCH et al., 2010; LOSS et al., 2015).

Nesse contexto, a ocorrência acidental do fogo em uma área conduzida sob plantio direto representa uma perturbação capaz de remover rapidamente parte da palhada acumulada e reduzir temporariamente a proteção superficial proporcionada pelos resíduos culturais. Em regiões com estação seca definida, como ocorre em parte do Cerrado, a baixa umidade do ar e da biomassa, associada ao acúmulo de material vegetal seco, pode favorecer a propagação do fogo. Além disso, alterações climáticas e o aumento da ocorrência de condições meteorológicas extremas podem ampliar a suscetibilidade de áreas agrícolas e naturais aos incêndios (ALVARES et al., 2013; AGBESHIE et al., 2022; ARUNRAT et al., 2024).

Do ponto de vista químico, a passagem do fogo pode produzir alterações imediatas na fertilidade do solo em decorrência da combustão da biomassa e da deposição de cinzas. Essas cinzas podem elevar temporariamente o pH e aumentar a disponibilidade de cátions básicos, como Ca^{2+}, Mg^{2+} e K^{+}. Por outro lado, dependendo da intensidade e da recorrência do evento, podem ocorrer perdas de elementos mais suscetíveis à volatilização, especialmente nitrogênio e enxofre, além de alterações na matéria orgânica e na dinâmica dos nutrientes. Dessa forma, os efeitos químicos da queima podem variar ao longo do tempo e em função das características do solo e do evento de fogo (CERTINI, 2005; RHEINHEIMER et al., 2003; PEREIRA et al., 2014; ALCAÑIZ et al., 2016).

Em relação aos atributos físicos, os efeitos do fogo podem ocorrer tanto pela ação térmica direta quanto indiretamente pela remoção da cobertura superficial. Alterações na estabilidade dos agregados, porosidade, densidade e infiltração de água têm sido relacionadas à intensidade do aquecimento e às modificações da matéria orgânica. Após a perda da palhada, a maior exposição da superfície também pode favorecer o selamento, o escoamento superficial e os processos erosivos, embora a intensidade dessas respostas dependa das propriedades do solo e da severidade da queima (CERTINI, 2005; SHAKESBY; DOERR, 2006; MATAIX-SOLERA et al., 2011; BODÍ et al., 2014).

Os processos biológicos também são sensíveis às perturbações provocadas pelo fogo. Alterações na temperatura do solo, na disponibilidade de substratos orgânicos e nas condições microambientais podem modificar a biomassa e a composição das comunidades

microbianas e, consequentemente, processos relacionados à decomposição da matéria orgânica e à ciclagem de nutrientes (CERTINI, 2005; DOOLEY; TRESEDER, 2012; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019). Entre os indicadores utilizados para avaliar essas respostas estão as enzimas do solo, cuja atividade está relacionada às transformações bioquímicas de elementos essenciais. Nesse contexto, a fosfatase ácida participa da mineralização de compostos orgânicos de fósforo, contribuindo para a disponibilização de formas inorgânicas desse nutriente no solo. A atividade enzimática pode, portanto, fornecer informações complementares sobre alterações nos processos biológicos associados ao ciclo do fósforo.

Além da avaliação direta dos atributos edáficos, as alterações promovidas pelo fogo podem apresentar distribuição heterogênea no espaço, em razão de diferenças na quantidade de biomassa combustível, intensidade da queima, relevo e propriedades do solo. Nesse sentido, a análise da variabilidade espacial permite identificar padrões de distribuição dos atributos e verificar a existência de dependência espacial, contribuindo para a compreensão da heterogeneidade da área atingida e para a comparação com regiões não afetadas pelo evento (CAMBARDELLA et al., 1994; MOLIN; CASTRO, 2008).

O sensoriamento remoto constitui uma abordagem complementar para acompanhar alterações na cobertura vegetal decorrentes da ocorrência do fogo. Entre os índices espectrais empregados, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) permite representar variações na presença e no vigor da vegetação a partir da relação entre a refletância nas regiões do vermelho e do infravermelho próximo. Em áreas atingidas por queimadas, a análise temporal desse índice possibilita identificar mudanças na cobertura vegetal e acompanhar seu posterior restabelecimento, especialmente quando são utilizadas séries de imagens obtidas antes e após o evento (ROUSE et al., 1974; XUE; SU, 2017; YAN et al., 2025).

Embora os efeitos do fogo sobre propriedades do solo sejam amplamente documentados, sua magnitude é condicionada pelas características do evento, pelo ambiente e pelo intervalo transcorrido entre a queima e a avaliação. Em áreas agrícolas sob plantio direto, a ocorrência acidental do fogo sobre os resíduos culturais torna relevante a

avaliação conjunta de atributos químicos, físicos e biológicos do solo, associada à análise de sua distribuição espacial e às alterações temporais da cobertura vegetal. Essa abordagem permite verificar se diferenças entre zonas atingidas e não atingidas pelo fogo ainda são detectáveis após determinado período do evento, sem pressupor previamente a persistência ou a recuperação dos atributos avaliados (CERTINI, 2005; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019; ARUNRAT et al., 2024).

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar os atributos físicos, químicos e a atividade da fosfatase ácida do solo em áreas atingida e não atingida por uma queima acidental, considerando as camadas de 0–10 e 10–20 cm, bem como caracterizar a variabilidade espacial dos atributos do solo e avaliar a dinâmica temporal da cobertura vegetal por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contextualização do Sistema Plantio Direto e os Efeitos do Fogo na Sucessão Soja-Milho

O Sistema Plantio Direto (SPD) constitui uma estratégia de manejo conservacionista fundamentada na redução do revolvimento do solo, na manutenção de cobertura vegetal sobre a superfície e na diversificação de espécies cultivadas. A adoção conjunta desses princípios favorece a conservação do solo e da água, a manutenção dos resíduos culturais na superfície e o acúmulo de matéria orgânica, contribuindo para a melhoria de atributos relacionados à qualidade do solo (DERPSCH et al., 2010; LOSS et al., 2015). Entretanto, a simples ausência de revolvimento não caracteriza, isoladamente, a adoção plena do SPD, uma vez que a diversificação de culturas constitui um de seus componentes fundamentais.

Nesse contexto, áreas conduzidas predominantemente com sucessão soja-milho, embora permaneçam sem revolvimento e mantenham resíduos culturais sobre a superfície, apresentam menor diversificação quando comparadas a sistemas que incluem rotação com maior número de espécies. Essa distinção é importante para o presente estudo, uma vez

que a área experimental vem sendo cultivada em sucessão soja-milho há mais de 15 anos. Portanto, neste trabalho, a referência ao plantio direto está relacionada principalmente ao histórico de ausência de preparo convencional e à manutenção dos resíduos culturais sobre a superfície, sem pressupor que a sucessão soja-milho, isoladamente, contemple integralmente todos os princípios preconizados para o SPD.

A permanência da palhada sobre a superfície exerce papel importante na proteção do solo, reduzindo o impacto direto das gotas de chuva, o escoamento superficial e as perdas por erosão, além de contribuir para a conservação da umidade e para a regulação da temperatura. A decomposição gradual desses resíduos também participa da entrada de carbono e da ciclagem de nutrientes no sistema. Dessa forma, alterações bruscas na quantidade de resíduos presentes sobre o solo podem modificar as condições estabelecidas pelo manejo conservacionista (DERPSCH et al., 2010; LOSS et al., 2015).

Entre essas perturbações, a ocorrência de fogo pode provocar a combustão parcial ou total dos resíduos vegetais acumulados na superfície. Seus efeitos sobre o solo são condicionados pela intensidade e duração do evento, quantidade e tipo de material combustível, teor de água do solo e frequência de ocorrência. Por essa razão, queimadas de diferentes características podem resultar em respostas distintas, variando desde alterações superficiais e transitórias até modificações mais pronunciadas nos atributos edáficos (CERTINI, 2005; SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014; AGBESHIE et al., 2022).

A remoção da cobertura vegetal constitui ainda um efeito indireto relevante do fogo. Mesmo quando o aquecimento não provoca alterações persistentes nas camadas mais profundas, a combustão da palhada modifica imediatamente a interface solo-atmosfera. A superfície passa a apresentar maior exposição à radiação solar e ao impacto das gotas de chuva, podendo ocorrer modificações na temperatura e umidade do solo, infiltração de água e suscetibilidade à erosão (SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014). Assim, os efeitos de uma queima não devem ser interpretados exclusivamente a partir da transferência direta de calor para o solo, mas também das consequências decorrentes da perda da cobertura superficial.

Do ponto de vista químico, a combustão da biomassa pode promover a liberação rápida de elementos minerais e a deposição de cinzas na superfície, ocasionando alterações temporárias no pH e na disponibilidade de nutrientes. Em contrapartida, determinados elementos podem ser perdidos por volatilização, enquanto outros permanecem nas cinzas e podem ser redistribuídos ou removidos posteriormente. A magnitude e a persistência dessas alterações dependem das características do fogo, do solo e das condições ambientais posteriores ao evento (CERTINI, 2005; ALCAÑIZ et al., 2016; AGBESHIE et al., 2022).

Os efeitos também podem alcançar os componentes biológicos do solo. A microbiota participa da decomposição dos resíduos orgânicos e das transformações de carbono, nitrogênio, fósforo e outros nutrientes, exercendo papel importante na ciclagem e na manutenção da disponibilidade de nutrientes no sistema solo-planta. Alterações provocadas pelo fogo na temperatura, umidade, quantidade de resíduos e disponibilidade de substratos podem, portanto, modificar a biomassa, a composição e a atividade das comunidades microbianas (CERTINI, 2005; DOOLEY; TRESEDER, 2012; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019).

A atividade enzimática representa uma das formas de avaliar processos bioquímicos associados à ciclagem de nutrientes no solo. Entre essas enzimas, as fosfatases estão diretamente relacionadas ao ciclo do fósforo, catalisando a hidrólise de compostos orgânicos fosfatados e liberando fosfato inorgânico potencialmente disponível para absorção pelas plantas e pelos microrganismos. Consequentemente, alterações nas condições ambientais e na disponibilidade de substratos após a ocorrência do fogo podem refletir-se na atividade dessas enzimas. No presente estudo, entretanto, a avaliação biológica foi restrita à atividade da fosfatase ácida, razão pela qual seus resultados devem ser interpretados especificamente como um indicador bioquímico relacionado ao ciclo do fósforo, e não como uma avaliação abrangente da qualidade microbiológica do solo.

Além disso, os efeitos do fogo não necessariamente apresentam distribuição uniforme na área atingida. A heterogeneidade da cobertura vegetal, da quantidade de material combustível e das propriedades do solo pode resultar em diferentes intensidades de perturbação e, consequentemente, em variação espacial dos atributos edáficos. A análise

geoestatística torna-se, nesse contexto, uma ferramenta útil para caracterizar a estrutura dessa variabilidade e identificar padrões espaciais que poderiam ser pouco evidentes quando considerados apenas os valores médios dos atributos (CAMBARDELLA et al., 1994).

No caso de uma queima acidental e pontual, a interpretação dos efeitos também deve considerar o intervalo entre a ocorrência do evento e a realização das avaliações. Alterações observadas imediatamente após o fogo não necessariamente permanecem ao longo do tempo, pois processos de lixiviação, redistribuição de nutrientes, decomposição de novos resíduos, desenvolvimento das culturas e restabelecimento da cobertura vegetal podem modificar progressivamente as condições da superfície e do solo. Dessa maneira, avaliações realizadas vários meses após o evento representam principalmente os efeitos ainda detectáveis naquele momento, e não necessariamente a magnitude das alterações imediatamente após a passagem do fogo (CERTINI, 2005; ALCAÑIZ et al., 2016; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019).

No presente estudo, essa consideração é particularmente importante, pois a queima acidental ocorreu em agosto de 2024, enquanto as amostras de solo foram coletadas em 25 e 26 de julho de 2025, aproximadamente 11 meses após o evento. Portanto, as comparações entre as áreas atingida e não atingida pelo fogo devem ser interpretadas como uma avaliação das diferenças remanescentes após esse intervalo, e não como uma mensuração dos efeitos imediatos da queima.

2.2 Efeitos da Queima nos Atributos Químicos do Solo

A ocorrência do fogo pode modificar os atributos químicos do solo tanto pela ação direta do aquecimento quanto pela combustão da biomassa e consequente deposição de cinzas sobre a superfície. A magnitude dessas alterações depende de fatores como intensidade e duração da queima, quantidade e composição do material combustível, temperatura atingida, propriedades do solo e intervalo entre o evento e a avaliação. Dessa forma, os efeitos podem variar desde alterações temporárias na disponibilidade de nutrientes até perdas mais expressivas de matéria orgânica e elementos suscetíveis à

volatilização em eventos de maior severidade (CERTINI, 2005; ALCAÑIZ et al., 2016; AGBESHIE et al., 2022).

A deposição de cinzas também pode modificar temporariamente a disponibilidade de bases trocáveis. Elementos presentes na biomassa, como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), podem retornar rapidamente ao solo após a combustão dos resíduos, ocasionando aumento de suas concentrações na camada superficial. Entretanto, esse enriquecimento não representa necessariamente um incremento persistente da fertilidade, pois os nutrientes liberados podem ser redistribuídos no perfil ou perdidos por erosão e lixiviação após a remoção da cobertura superficial (CERTINI, 2005; PEREIRA et al., 2014; ALCAÑIZ et al., 2016).

Os nutrientes apresentam comportamentos distintos durante a combustão. Elementos com maior suscetibilidade à volatilização podem apresentar perdas significativas à medida que a temperatura aumenta, enquanto outros permanecem predominantemente nas cinzas e podem apresentar aumento temporário de disponibilidade. Assim, a resposta química do solo após o fogo resulta simultaneamente da liberação de nutrientes presentes na biomassa, deposição das cinzas, perdas gasosas e posterior redistribuição dos elementos no sistema (CERTINI, 2005; AGBESHIE et al., 2022).

A matéria orgânica do solo constitui outro componente particularmente relevante na interpretação dos efeitos do fogo. Sua resposta depende da temperatura alcançada e do tempo de exposição ao aquecimento. Em condições de maior severidade, a combustão pode promover perdas de carbono orgânico e modificar a composição da matéria orgânica remanescente. Por outro lado, em queimadas superficiais e de menor intensidade, os efeitos nas camadas minerais podem ser menos pronunciados, especialmente quando o aquecimento se concentra nos resíduos existentes sobre a superfície (CERTINI, 2005; KNICKER, 2007; ALCAÑIZ et al., 2016).

Alterações na matéria orgânica possuem implicações que ultrapassam a quantidade de carbono presente no solo, uma vez que essa fração participa da retenção e disponibilização de nutrientes e contribui para a capacidade de troca de cátions, particularmente em solos tropicais altamente intemperizados. Consequentemente,

mudanças na quantidade ou nas características da matéria orgânica após o fogo podem repercutir sobre diferentes componentes da fertilidade do solo. Entretanto, a magnitude dessas respostas deve ser interpretada considerando a severidade da queima e o período transcorrido após o evento.

O fósforo (P) também pode apresentar alterações após a ocorrência do fogo. A combustão dos resíduos vegetais pode converter parte do P presente em formas orgânicas em formas inorgânicas, que permanecem nas cinzas e podem contribuir para um aumento inicial de sua disponibilidade. Contudo, o comportamento posterior desse nutriente é condicionado pelas características químicas e mineralógicas do solo. Em solos tropicais altamente intemperizados, a presença de óxidos de Fe e Al favorece processos de adsorção do fosfato, podendo reduzir progressivamente a permanência do P em formas prontamente disponíveis.

Esse comportamento é particularmente relevante em Latossolos, nos quais a elevada capacidade de retenção de fósforo pode limitar a persistência de aumentos temporários ocasionados pela deposição de cinzas. Assim, mesmo quando ocorre uma entrada imediata de P após a combustão da biomassa, parte desse nutriente pode posteriormente ser redistribuída entre compartimentos com diferentes graus de disponibilidade. Por essa razão, a ausência de diferenças entre áreas queimada e não queimada vários meses após o evento não permite concluir, isoladamente, que nenhuma alteração química tenha ocorrido imediatamente após a passagem do fogo; indica apenas que determinadas diferenças podem não permanecer detectáveis no momento posterior da amostragem.

Além dos efeitos diretos da combustão, a retirada da cobertura vegetal pode influenciar indiretamente a dinâmica química do solo. A redução da palhada aumenta a exposição da superfície às condições atmosféricas e pode modificar a temperatura e a umidade, além de favorecer processos erosivos e o transporte de cinzas e partículas. Consequentemente, a resposta dos atributos químicos após uma queima resulta da interação entre os efeitos imediatos do aquecimento e da deposição de cinzas e os processos que ocorrem posteriormente no ambiente (SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014; ALCAÑIZ et al., 2016).

O intervalo transcorrido entre a ocorrência do fogo e a amostragem constitui, portanto, um aspecto essencial para a interpretação dos resultados. Alterações observadas imediatamente após uma queima podem diminuir ao longo do tempo em decorrência da lixiviação e redistribuição de nutrientes, absorção pelas plantas, erosão, decomposição de novos resíduos vegetais e retomada dos processos biogeoquímicos. Estudos que avaliam o solo meses após a ocorrência do fogo representam, assim, uma condição diferente daqueles realizados imediatamente após o evento (CERTINI, 2005; ALCAÑIZ et al., 2016; AGBESHIE et al., 2022).

No presente estudo, essa condição temporal é especialmente importante, pois a queima ocorreu em agosto de 2024 e as amostras de solo foram coletadas em julho de 2025, aproximadamente 11 meses após o evento. Dessa forma, os atributos químicos avaliados representam as condições existentes no momento da amostragem e permitem identificar diferenças ainda detectáveis entre as áreas atingida e não atingida pelo fogo, mas não quantificar diretamente as alterações químicas ocorridas imediatamente após a queima.

2.3 Efeitos da Queima nos Atributos Físicos do Solo

A ação do fogo sobre o solo também causa impactos significativos nos atributos físicos, afetando diretamente sua estrutura, porosidade, retenção de água e estabilidade dos agregados. A combustão da cobertura vegetal reduz a proteção superficial do solo, tornando-o mais suscetível à ação direta das chuvas, que intensificam processos de compactação, selamento superficial e erosão hídrica (SPERA et al., 2000; REDIN et al., 2011). A perda da palhada agrava a degradação estrutural, favorecendo a formação de crostas superficiais que dificultam a infiltração de água.

Entre os atributos mais afetados, destaca-se a redução da macroporosidade e do diâmetro médio dos agregados, comprometendo a aeração e a capacidade de retenção de água do solo (REDIN et al., 2011; BASTOS et al., 2005). O aumento da densidade aparente e a compactação da camada superficial também são comuns, principalmente quando o solo se encontra desprotegido após a queima, e está exposto ao impacto direto das gotas de chuva (SPERA et al., 2000; ARAÚJO et al., 1994).

A estabilidade de agregados, fundamental para a conservação do solo, depende em grande medida da presença de substâncias húmicas e da atividade biológica, como hifas de fungos e exsudatos microbianos. A redução da matéria orgânica e da biomassa microbiana após o fogo interfere diretamente nesse equilíbrio, prejudicando a agregação das partículas do solo (BASTOS et al., 2005; TISDALL E OADES, 1982). Com isso, há uma maior propensão à degradação estrutural, dificultando o desenvolvimento radicular e o estabelecimento das culturas.

É importante considerar que a intensidade dos efeitos físicos varia conforme o tipo de solo, sua textura, histórico de manejo e frequência das queimadas. Em Latossolos argilosos, como os da região de Dourados-MS, os impactos podem ser amenizados pela estrutura granular intrínseca, mas ainda assim são relevantes diante de queimas recorrentes (SPERA et al., 2000; RHEINHEIMER et al., 2003). Em solos mais arenosos ou degradados, os danos estruturais tendem a ser mais severos e de difícil reversão.

Portanto, a queima pode comprometer a integridade física do solo ao reduzir sua capacidade de infiltração e armazenamento de água, aumentar sua compactação e favorecer a erosão (CERTINI, 2005; SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014). Tais alterações podem dificultar a recuperação natural do ambiente e comprometer a conservação do solo em sistemas agrícolas. A compreensão desses efeitos é essencial para subsidiar práticas de manejo voltadas à conservação do solo em áreas sujeitas à ocorrência de queimadas (SHAKESBY; DOERR, 2006; BODÍ et al., 2014).

2.4 Efeitos da Queima na Microbiologia e Atividade Enzimática do Solo

A microbiota do solo é um componente vital para a ciclagem de nutrientes, decomposição da matéria orgânica e manutenção da fertilidade. Entretanto, a ocorrência do fogo pode alterar significativamente a composição, diversidade e atividade dos microrganismos do solo, principalmente em decorrência do aumento da temperatura, da remoção da cobertura vegetal e da redução da disponibilidade de substratos orgânicos, comprometendo importantes processos biogeoquímicos do ecossistema." (CERTINI, 2005; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019) A destruição da matéria orgânica

superficial implica menor fornecimento de energia para a microbiota, resultando na diminuição da biomassa microbiana e da atividade enzimática.

Estudos mostram que o fogo pode reduzir significativamente o carbono da biomassa microbiana e alterar a atividade de enzimas do solo, como desidrogenase, fosfatase, urease e arilsulfatase, as quais são consideradas importantes indicadores da atividade biológica e da funcionalidade dos processos bioquímicos do solo (ALEF; NANNIPIERI, 1995; DOOLEY; TRESEDER, 2012). Essas alterações ocorrem principalmente devido ao aumento da temperatura, à redução dos substratos orgânicos disponíveis e às modificações na composição da comunidade microbiana após a queima (CERTINI, 2005; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019). A redução dessas atividades implica menor eficiência na mineralização e imobilização de nutrientes essenciais, como o nitrogênio e o fósforo, comprometendo o ciclo de nutrientes no solo.

Do ponto de vista ecológico, a exposição do solo ao calor intenso pode provocar alterações na composição e estrutura das comunidades microbianas, reduzindo grupos sensíveis ao estresse térmico e favorecendo microrganismos mais tolerantes às condições impostas pelo fogo (DOOLEY; TRESEDER, 2012; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019). Em áreas submetidas a queimadas recorrentes, grupos microbianos envolvidos no ciclo do nitrogênio, incluindo arqueias e bactérias nitrificantes, podem apresentar modificações em sua abundância e atividade, afetando processos como a nitrificação e a disponibilidade de formas minerais de nitrogênio no solo (NARDOTO; BUSTAMANTE, 2003; BARREIRO; DÍAZ-RAVIÑA, 2021).

Ainda que algumas enzimas possam apresentar aumento momentâneo de atividade após a queima devido à liberação de nutrientes pelas cinzas esse efeito é temporário e tende a ser seguido por um colapso na atividade biológica geral, sobretudo se não houver reposição da cobertura orgânica e estabilidade ambiental (DICK et al., 2008; REDIN et al., 2011). A ausência de microrganismos benéficos prejudica a formação de agregados, a degradação de resíduos e a formação de complexos húmicos estáveis.

Assim, a ocorrência do fogo pode alterar a composição e a atividade da microbiota do solo, com possíveis reflexos sobre processos relacionados à decomposição da matéria

orgânica e à ciclagem de nutrientes (DOOLEY; TRESEDER, 2012; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019). Essas alterações podem repercutir sobre a atividade enzimática e sobre processos bioquímicos associados à disponibilidade de nutrientes no solo (CERTINI, 2005; PRESSLER; MOORE; COTRUFO, 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está situada na Fazenda Santa Hilda, localizada no município de Dourados, estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, sob as coordenadas geográficas 22°11'48.73" S e 54°52'29.52" O, a uma altitude média de 410 metros. O clima da região é classificado como Am, tropical de monção, segundo a classificação climática de Köppen apresentada por Alvares et al. (2013). O solo predominante na área é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico, de textura argilosa, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2018).

No local de estudo, ocorreu em agosto de 2024 uma queima acidental da palhada em área conduzida sob sistema de plantio direto (SPD), afetando parte significativa da área cultivada (Figura 1). O evento alterou as condições de cobertura superficial e despertou interesse na avaliação dos efeitos da queima sobre as propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo. A amostragem foi realizada nos dias 25 e 26 de julho de 2025, aproximadamente 11 meses após a ocorrência da queimada.

Para a caracterização espacial da área, foram distribuídos 50 pontos amostrais georreferenciados de forma sistemática por meio de uma malha regular, abrangendo as áreas afetada e não afetada pela queima, conforme apresentado na Figura 1. Do total de pontos amostrais, 18 estavam localizados na área afetada pela queima e 32 na área não afetada. Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm. A diferença no número de pontos entre as duas condições decorreu da extensão e da distribuição espacial da área efetivamente atingida pelo fogo em relação à malha amostral, uma vez que os pontos foram definidos sistematicamente pela grade de amostragem, e não selecionados em função da ocorrência ou ausência da queima.

Figura 1. Área de coleta de solo e distribuição dos pontos de amostragem.



Fonte: (Autora, 2025)

3.1 Pontos amostrais

Os pontos amostrais foram definidos por meio de uma grade regular (grid), distribuída sistematicamente sobre a área experimental. A localização de cada ponto foi estabelecida a partir do centróide das células da malha amostral, garantindo maior uniformidade espacial e representatividade da área avaliada. Esse procedimento é utilizado em estudos de variabilidade espacial de atributos do solo, permitindo a obtenção de informações representativas da distribuição dos atributos avaliados (MOLIN; CASTRO, 2008; CAMBARDELLA et al., 1994). Dessa forma, a localização dos pontos não foi definida manualmente, mas determinada pelo posicionamento sistemático da malha amostral conforme os limites da área experimental.

Todos os pontos amostrais foram georreferenciados com base em coordenadas obtidas no sistema de referência espacial adotado para o mapeamento da área experimental,

garantindo precisão na localização dos pontos e permitindo a reprodutibilidade das etapas de coleta, organização e análise espacial dos dados do solo (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015). O processamento e a representação espacial dos pontos foram realizados no software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2024), o que possibilitou a integração de informações geográficas e a elaboração de mapas temáticos de alta acurácia.

3.2 Análises químicas do solo

As amostras de solo coletadas nas camadas de 0–10 e 10–20 cm foram submetidas às análises químicas de pH em água e $CaCl_2$, fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), enxofre (S), acidez potencial (H+Al) e matéria orgânica (MO), conforme os procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017).

As amostras foram previamente secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, obtendo-se a terra fina seca ao ar (TFSA), sendo posteriormente homogeneizadas para as análises. O pH do solo foi determinado em suspensão solo: água na proporção 1:2,5, utilizando-se pHmetro previamente calibrado com soluções-padrão de pH 4,0 e 7,0, sendo a leitura realizada após a estabilização da suspensão.

Os teores de fósforo (P) e potássio (K) disponíveis foram determinados por extração com solução Mehlich-1, na relação solo: extrator de 1:10, seguida de agitação e filtração, sendo o fósforo quantificado por colorimetria e o potássio por fotometria de chama. Os cátions trocáveis cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) foram extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1}, na mesma proporção, sendo determinados por titulação complexométrica com EDTA ou por espectrofotometria de absorção atômica. O enxofre (S), na forma de sulfato, foi determinado após extração específica, sendo quantificado por turbidimetria.

A matéria orgânica do solo foi determinada pelo método de oxidação úmida (Walkley-Black), utilizando dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido (H_2SO_4), com posterior titulação do excesso de oxidante com solução de sulfato ferroso, permitindo a quantificação indireta do carbono orgânico e sua conversão em matéria orgânica.

3.3 Analise granulométrica

A análise granulométrica foi conduzida pelo método da pipeta, utilizando solução de hexametafosfato de sódio (0,1 mol L^{-1}) como dispersante químico e agitação mecânica. A fração areia foi separada por peneiramento úmido em malha de 0,053 mm, enquanto as frações silte e argila foram determinadas por sedimentação conforme a Lei de Stokes. Os resultados foram expressos em porcentagem de areia, silte e argila em relação à massa de solo seco, permitindo a classificação textural do solo e a caracterização de atributos relacionados à retenção de água, dinâmica de nutrientes e comportamento biológico do solo (TEIXEIRA et al., 2017). O teor de argila total obtido nessa análise, mediante o emprego do agente dispersante químico, foi posteriormente utilizado em conjunto com o teor de argila dispersa em água para o cálculo do grau de floculação.

A análise granulométrica do solo evidenciou predominância da fração argila, com teores de 60,11% na camada de 0–10 cm e 53,66% na camada de 10–20 cm, classificando o solo como de textura argilosa segundo a classificação da Embrapa (2018).

3.4 Argila dispersa em água e grau de floculação

A determinação da argila dispersa em água (ADA) foi conduzida conforme o método descrito pela Embrapa (2017), com adaptações para as condições do presente estudo. Inicialmente, procedeu-se à determinação da umidade residual do solo, utilizada para o cálculo do fator de correção (f). Em seguida, foram pesados 20 g de solo em béquer de 50 mL, utilizando-se balança analítica com precisão de 0,001 g. A amostra foi então transferida para potes adaptados para o agitador, sendo adicionados 300 mL de água destilada.

As amostras foram submetidas à agitação mecânica horizontal por 16 horas, a uma velocidade constante de 150 ciclos por minuto, visando à dispersão das partículas de argila sem o uso de agente químico dispersante. Após a agitação, as amostras foram homogeneizadas vigorosamente por aproximadamente 1 minuto, utilizando-se bastão com tampa de borracha, garantindo a uniformidade da suspensão.

Logo após a homogeneização, foi realizada a medição da temperatura da suspensão de cada amostra, etapa necessária para determinar o tempo de sedimentação segundo a Lei de Stokes. As temperaturas registradas variaram entre 20 °C e 23 °C, exceto uma amostra que apresentou 18 °C. De acordo com os valores observados, os tempos de repouso foram determinados conforme a Tabela 1 de Almeida et al. (2012), apresentada no Manual de Métodos de Análise de Solo da Embrapa (2017), considerando a profundidade de leitura de 5 cm. Assim, o período de sedimentação das amostras variou de aproximadamente 3 h 28 min a 3 h 58 min, com tempo de 4 h 58 min para a amostra a 18 °C.

Decorrido o tempo de repouso estabelecido para cada amostra, procedeu-se à retirada de 25 mL da suspensão na profundidade de 5 cm, utilizando-se pipeta de precisão. O volume coletado foi transferido para cadinhos de 50 mL previamente tarados e identificados, os quais foram levados à estufa a 105 °C por 24 horas para secagem completa. Após o resfriamento, os cadinhos foram pesados em balança analítica, obtendo-se a massa correspondente à argila dispersa em água (ADA).

Os resultados foram posteriormente utilizados para o cálculo do índice de dispersão de argila (IDA), conforme (equação 1) determinado pela relação entre a argila dispersa em água e a argila total, conforme a expressão:

$$IDA(\%) = \frac{Argila\ dispersa\ \ em\ agua\ (ADA)}{Argila\ total\ (AT)}.100 \qquad (1)$$

3.5 Estabilidade de agregados e índice de estabilidade

A determinação da estabilidade de agregados foi realizada conforme metodologia proposta por Kemper e Chepil (1965), adaptada por Carpenedo e Mielniczuk (1990) e Silva e Mielniczuk (1997), conforme descrito pela Embrapa (2017), com adequações às condições do presente estudo. Inicialmente, 50 g de solo seco ao ar foram peneirados, eliminando-se partículas superiores a 9,52 mm. O material passante foi transferido para o conjunto de peneiras de 4,76 mm; 2,00 mm; 1,00 mm; 0,50 mm e 0,25 mm, acopladas a um agitador mecânico vibratório, onde permaneceu por 1 minuto para a separação das classes de agregados. O material retido em cada peneira e no fundo foi transferido para cadinhos

identificados, pesados e anotados, obtendo-se a distribuição percentual dos agregados por via seca.

Posteriormente, as amostras foram reconstituídas e submetidas à via úmida, sendo colocadas sobre papel filtro para umedecimento por capilaridade durante 16 horas. Após esse período, as amostras foram transferidas para o equipamento Yoder, contendo as mesmas classes de peneiras, e submetidas à agitação vertical por 15 minutos a 42 oscilações por minuto. O material retido em cada peneira foi removido, colocado em cadinho identificado, seco em estufa a 105 °C por 24 horas, e posteriormente pesado para obtenção das massas retidas.

A partir da distribuição dos agregados nas diferentes classes de tamanho, foram determinados, dentro da mesma análise de estabilidade de agregados, o diâmetro médio ponderado por via seca (DMPs) e o diâmetro médio ponderado por via úmida (DMPu), conforme as (equações 2 e 3)

$$DMPs = \sum(x_{is} \, . \, w_{is}) \quad (2)$$

$$DMPu = \sum(x_{iu} \, . \, w_{iu}) \quad (3)$$

Em que:

DMPs – diâmetro médio ponderado, por via seca, em mm.

DMPu – diâmetro médio ponderado, por via úmida, em mm.

wis – proporção de agregados em cada classe/peneira (i), por via seca, em %.

xis – diâmetro médio de cada classe, por via seca, em mm.

wiu – proporção de agregados em cada classe/peneira (i), por via úmida, em %.

xiu – diâmetro médio de cada classe, por via úmida, em mm.

A partir dos valores de DMP obtidos, calculou-se o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) (conforme a equação 4):

$$IEA = \frac{DMPu}{DMPs} . 100 \quad (4)$$

Em que:

IEA = índice de estabilidade de agregados, em %;

DMPu = diâmetro médio ponderado por via úmida, em mm; DMPs = diâmetro médio ponderado por via seca, em mm.

3.6 Atividade enzimatica no solo

A atividade da enzima fosfatase ácida foi determinada segundo o método colorimétrico descrito por Tabatabai e Bremner (1969), adaptado conforme o protocolo de laboratório da Embrapa (2017). A atividade dessa enzima foi utilizada como indicador bioquímico relacionado aos processos de mineralização do fósforo orgânico no solo, não sendo considerada, isoladamente, como medida da qualidade microbiológica global do solo. O princípio do método baseia-se na liberação de p-nitrofenol (PNF) a partir do substrato p-nitrofenil fosfato, catalisada pela atividade da fosfatase ácido presente no solo. O produto da reação apresenta coloração amarela, cuja intensidade é proporcional à atividade enzimática e quantificada por espectrofotometria a 410 nm.

A solução tampão MUB (Modified Universal Buffer) foi preparada conforme o procedimento adaptado do protocolo descrito pela Embrapa (2017), utilizado para determinação da atividade enzimática da fosfatase ácida. Para o preparo da solução estoque de MUB, foram pesados 12,1 g de TRIS (THAM), 11,6 g de ácido maleico, 14,0 g de ácido cítrico e 6,3 g de ácido bórico. Os reagentes foram adicionados sequencialmente a um béquer contendo aproximadamente 488 mL de solução de NaOH 1,0 N, sob agitação constante até completa dissolução. Após a solubilização de todos os componentes, o volume foi completado para 1 L com água destilada, homogeneizando-se completamente a solução.

Em seguida, procedeu-se ao ajuste de pH da solução tampão para 6,5, valor ideal para a determinação da atividade da enzima fosfatase ácida. Para isso, foram utilizados 200 mL da solução estoque de MUB, cujo pH foi ajustado gradualmente mediante a adição controlada de HCl 0,1 N, até a obtenção do valor desejado. Após o ajuste, o volume foi

novamente completado para 1 L com água destilada. A solução final foi armazenada em frascos âmbar devidamente rotulados e mantida sob refrigeração, a fim de preservar sua estabilidade química e evitar alterações de pH até o momento do uso.

Além da solução tampão MUB, foram preparadas as soluções auxiliares utilizadas na determinação da atividade da enzima fosfatase ácida, conforme o protocolo descrito pela Embrapa (2017). A solução de ácido clorídrico (HCl) a 10% foi obtida medindo-se 900 mL de água destilada, aos quais foram adicionados 100 mL de HCl concentrado, completando-se o volume final para 1 litro. O preparo foi realizado em capela de exaustão, a fim de evitar a inalação dos vapores ácidos liberados durante o processo de diluição, garantindo a segurança do operador e a integridade da solução.

A solução de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) 0,5 mol L^{-1} foi preparada pela dissolução de 73,5 g de $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ em aproximadamente 700 mL de água destilada, sob agitação até completa solubilização, completando-se o volume para 1 litro com água destilada. Já a solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,5 mol L^{-1} foi obtida pela dissolução de 20 g de NaOH sólido em 700 mL de água destilada, completando-se o volume para 1 litro. Ambas as soluções foram armazenadas em frascos de polietileno de alta densidade devidamente rotulados, sendo o $CaCl_2$ utilizado para interromper a reação enzimática e o NaOH para promover o desenvolvimento da coloração do p-nitrofenol (PNF) após a incubação.

O substrato p-nitrofenil fosfato (PNF) 0,05 mol L^{-1} foi preparado pela dissolução de 0,928 g de p-nitrofenil dissódico fosfato hexahidratado em 40 mL de tampão MUB, pH 6,5, completando-se o volume para 50 mL com o mesmo tampão. A solução foi mantida sob refrigeração até sua utilização. Para o preparo da curva-padrão, foi preparada uma solução estoque de p-nitrofenol pela dissolução de 1,0 g de p-nitrofenol em aproximadamente 700 mL de água destilada, completando-se o volume para 1 L, sendo a solução igualmente mantida sob refrigeração.

Para a determinação da atividade da fosfatase ácida, as amostras de solo foram previamente passadas em peneira de 4 mm, sendo removidos, com auxílio de pinça, raízes, tecidos vegetais e outros resíduos orgânicos grosseiros. Em seguida, foram pesados 1,000

± 0,005 g de solo em frascos Erlenmeyer de 50 mL. Para cada amostra foram conduzidas de três a quatro repetições analíticas, acompanhadas de um frasco controle (branco).

A cada frasco foram adicionados 4 mL de tampão MUB, pH 6,5. Nos frascos destinados ao ensaio enzimático, adicionou-se 1 mL da solução de p-nitrofenil fosfato (PNF) 0,05 mol L^{-1}, enquanto nos frascos controle o substrato não foi adicionado nessa etapa. Os frascos foram levemente agitados, vedados com rolha de borracha e incubados em estufa a 37 °C durante 1 hora.

Após o período de incubação, a reação enzimática foi interrompida mediante a adição de 1 mL de $CaCl_2$ 0,5 mol L^{-1} e 4 mL de NaOH 0,5 mol L^{-1} a todos os frascos. Imediatamente após a interrupção da reação, foi adicionado 1 mL da solução de PNF 0,05 mol L^{-1} aos frascos controle. As suspensões foram então homogeneizadas e filtradas em papel-filtro Whatman nº 2 ou Macherey-Nagel 616.

A intensidade da coloração amarela desenvolvida foi determinada por espectrofotometria a 410 nm, sendo a atividade da fosfatase ácida determinada a partir da quantidade de p-nitrofenol liberada durante o período de incubação.

3.7 Determinação do Indice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

O monitoramento da dinâmica da cobertura vegetal foi realizado por meio de imagens orbitais do satélite Sentinel-2 MultiSpectral Instrument (MSI), nível de processamento Level-2A (L2A), correspondentes à refletância de superfície, disponibilizadas gratuitamente pela plataforma Copernicus Data Space Ecosystem.

As imagens foram selecionadas priorizando cenas com baixa cobertura de nuvens, minimizando interferências atmosféricas e assegurando maior confiabilidade na comparação temporal dos índices espectrais (DRUSCH et al., 2012).

A avaliação temporal foi estruturada em três momentos distintos: antes da ocorrência da queima, imediatamente após o incêndio e após o estabelecimento da cultura da soja. A queima acidental ocorreu em agosto de 2024, após a colheita do milho, quando a superfície do solo se encontrava coberta por palhada de milho.

Inicialmente, foi utilizada imagem Sentinel-2 referente ao dia 08 de janeiro de 2024, correspondente ao período anterior à ocorrência da queima, quando a área se encontrava cultivada com soja.

Para caracterizar a área após a ocorrência da queima, utilizou-se imagem Sentinel-2 adquirida em 30 de agosto de 2024, correspondente ao período imediatamente posterior ao incêndio. Nessa etapa, foi empregada composição colorida natural (RGB 4-3-2), utilizada para identificação visual da cicatriz do fogo e delimitação da área atingida.

Após a ocorrência da queima, a área permaneceu em pousio por aproximadamente 41 dias, sendo a semeadura da cultura da soja realizada em 10 de outubro de 2024. A terceira etapa consistiu na utilização da imagem Sentinel-2 referente ao dia 18 de dezembro de 2024, aproximadamente 110 dias após a ocorrência da queima e 69 dias após a semeadura da soja. Na data de aquisição da imagem, a cultura encontrava-se entre os estádios fenológicos R3 (início da formação de vagens) e R4 (vagem completamente desenvolvida), conforme a escala fenológica proposta por Fehr e Caviness (1977).

O processamento das imagens foi realizado no software QGIS (QGIS Development Team, 2024). O cálculo do NDVI conforme (equação 5) foi efetuado utilizando as bandas B4 (665 nm – vermelho) e B8 (842 nm – infravermelho próximo), ambas com resolução espacial de 10 m, conforme a equação proposta por Rouse et al. (1974): g

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR-Red} \quad (5)$$

Em que NIR corresponde à refletância da banda do infravermelho próximo e Red à refletância da banda do vermelho. Os valores do NDVI variam entre -1 e +1, sendo que valores elevados indicam maior vigor vegetativo, maior densidade de biomassa verde e elevada atividade fotossintética, enquanto valores próximos de zero representam áreas com reduzida cobertura vegetal ou solo exposto (ROUSE et al., 1974; XUE; SU, 2017).

A composição RGB obtida após a queima e os mapas de NDVI referentes aos períodos anterior e posterior ao incêndio foram utilizados para avaliar espacial e temporalmente as alterações na cobertura vegetal da área experimental.

3.8 Análise Geoestatística

Para o tratamento dos dados espaciais, empregou-se o software QGIS (versão 3.16), um sistema de informações geográficas de código aberto que permite o gerenciamento e a análise de dados raster e vetoriais. No ambiente QGIS foi integrado o uso do plugin Smart-Map, o qual permite executar algoritmos de interpolação espacial (como a krigagem ordinária) e técnicas para geração de mapas temáticos de fertilidade do solo (PEREIRA et al., 2022). A interpolação dos dados foi realizada por meio da krigagem ordinária, utilizando-se o semivariograma experimental para avaliar a dependência espacial das variáveis estudadas, conforme os princípios da geoestatística. A partir do ajuste dos modelos teóricos aos semivariogramas experimentais, foi possível estimar os valores em locais não amostrados e gerar mapas de distribuição espacial dos atributos do solo (VIEIRA et al., 1983; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Em seguida, os mapas gerados foram classificados segundo os intervalos recomendados no manual Cerrados, correção do solo e adubação Embrapa (2004), orientando a interpretação agronômica dos atributos do solo.

Essa abordagem metodológica que combina software aberto, plugin especializado e técnicas de geoestatística garantiu a obtenção de mapas de alta resolução espacial, permitindo analisar de forma integrada os atributos físicos, químicos e biológicos do solo nos diferentes sistemas de manejo sob estudo. O grau de dependência espacial (GDE) é um dos principais indicadores utilizados na análise geoestatística para avaliar a estrutura espacial dos atributos do solo. Ele expressa a proporção da variância total que é explicada pela dependência espacial existente entre as amostras, permitindo inferir se a variabilidade do atributo está relacionada a fatores intrínsecos do solo (como textura, matéria orgânica e manejo) ou a fatores aleatórios (VIEIRA, 2000; CAMBARDELLA et al., 1994).

O GDE é calculado a partir dos parâmetros do semivariograma teórico ajustado efeito pepita (C_0) e patamar ($C_0 + C_1$), conforme a (equação 6).

$$GDE = \left(\frac{C_0}{C_0+C_1}\right).100 \quad (6)$$

C_0 = efeito pepita (variância não explicada pela dependência espacial), C_1 = variância estrutural (porção da variância explicada pela estrutura espacial), $C_0 + C_1$ = patamar (variância total).

O resultado do GDE é expresso em percentual (%), e sua interpretação segue os critérios propostos por Cambardella et al (1994), amplamente utilizados em estudos de variabilidade espacial do solo.

3.9 Análise estatística para atributos físicos do solo

Os atributos físicos do solo foram avaliados por meio de estatística descritiva, considerando as áreas com e sem queima acidental e as profundidades de 0–10 e 10–20 cm. Para cada atributo, foram calculados a média, o desvio-padrão e o erro-padrão da média. Os resultados foram apresentados em gráficos de barras, com indicação das médias e respectivas barras de erro, permitindo visualizar a variabilidade dos dados entre as condições avaliadas. As diferenças entre as médias foram interpretadas de forma descritiva, sem aplicação de testes de comparação múltipla, como o teste de Tukey, e sem atribuição de significância estatística às diferenças observadas.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variabilidade espacial da química do solo

A análise geoestatística dos atributos químicos do solo nas profundidades de 0 – 10 e 10–20 cm indicou a presença de estrutura espacial bem definida, ajustada predominantemente ao modelo esférico, o qual representa de forma adequada a continuidade dos atributos até determinado limite de alcance (VIEIRA, 2000). Na camada superficial (0–10 cm), observou-se que os atributos pH em H_2O e fósforo (P) apresentaram forte dependência espacial, com graus de dependência (GDE) de 82,3 % e 93,5 %, respectivamente, conforme demonstrado na (Tabela 1) .

Tabela 1 – Parâmetros geoestatísticos dos atributos químicos do solo na camada de 0–10 cm.

Atributo (Z)	Modelo	Co	Co + C	A (m)	R^2	GDE (%)	Classificação
pH (H_2O)	Esférico	0.009	0.051	521.9	0.555	82.3	Forte
K (cmolc/dm³)	Esférico	0.005	0.016	1148.1	0.561	68.8	Moderada
V (%)	Esférico	60.986	73.033	1151.7	0.168	16.5	Fraca
Ca (cmolc/dm³)	Esférico	2.623	4.757	519.3	0.643	44.9	Moderada
Mg (cmolc/dm³)	Esférico	0.282	0.627	1150.6	0.515	55.0	Moderada
P (mg/dm³)	Esférico	62.680	962.984	1151.7	0.908	93.5	Forte
MO (g/dm³)	Esférico	33.343	95.390	1151.7	0.932	65.0	Moderada

Fonte: (Autora,2025). **Nota:** C_0 = efeito pepita; $C_0 + C_1$ = patamar; A = alcance (m); R^2 = coeficiente de determinação; GDE = grau de dependência espacial.

Esse comportamento evidencia baixa variabilidade aleatória e elevada correlação entre os pontos amostrados, refletindo a influência direta de práticas de manejo, como calagem e adubação fosfatada, que promovem a homogeneização química da camada superficial (SOUZA, 2006). Segundo Silva (2021), o fósforo em solos tropicais apresenta baixa mobilidade e forte fixação em óxidos de ferro e alumínio, o que explica a estrutura espacial consistente e a estabilidade do nutriente em áreas sob cultivo contínuo.

Os semivariogramas isotrópicos confirmam esse padrão, revelando curvas ascendentes que atingem o patamar com nitidez, indicando continuidade espacial bem estabelecida. De acordo com a (Tabela 1), os atributos cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), matéria orgânica (MO) e saturação por bases (V %) apresentaram dependência espacial moderada, com valores de GDE variando entre 32 % e 71 % e alcances médios próximos de 1.150 m. Essa condição demonstra a influência combinada

de fatores pedogenéticos e antrópicos sobre a distribuição dos nutrientes, conforme apontado por Carvalho (2002), que ressalta que a variabilidade química de solos agrícolas é controlada tanto pelas propriedades intrínsecas quanto pelo histórico de uso e manejo. Assim, a camada de 0–10 cm reflete maior uniformidade química e maior correlação entre os pontos amostrados, resultado do manejo conservacionista e da ciclagem superficial de nutrientes.

Tabela 2 – Parâmetros geoestatísticos dos atributos químicos do solo na camada de 10–20 cm

Atributo (Z)	Modelo	Co	Co + C	A (m)	R^2	GDE (%)	Classificação
pH (H_2O)	Esférico	0.019	0.048	496.5	0.124	60.4	Moderada
K (cmolc/dm³)	Linear	0.008	0.009	745.0	0.494	11.1	Fraca
V (%)	Esférico	78.605	116.30	1151.7	0.201	32.4	Moderada
Ca (cmolc/dm³)	Esférico	2.668	4.228	1150.6	0.313	36.9	Moderada
Mg (cmolc/dm³)	Esférico	0.282	0.627	1150.6	0.515	55.0	Moderada
P (mg/dm³)	Esférico	343.17	1048.81	1152.4	0.936	67.3	Moderada
MO (g/dm³)	Esférico	15.457	53.948	1151.7	0.541	71.3	Moderada

Fonte: (Autora,2025). **Nota:** C_0 = efeito pepita; $C_0 + C_1$ = patamar; A = alcance (m); R^2 = coeficiente de determinação; GDE = grau de dependência espacial

Na camada de 10–20 cm, observou-se redução da homogeneidade e da continuidade espacial dos atributos, com dependência predominantemente moderada, conforme descrito na (Tabela 2) e ilustrado na (Figura 4). O modelo esférico manteve-se ajustado à maioria das variáveis, entretanto, o potássio (K^+) apresentou comportamento distinto, ajustando-se melhor ao modelo linear e demonstrando fraca dependência espacial (GDE de 11,1 %). Essa baixa correlação é atribuída à elevada mobilidade do K^+ no perfil do solo e à sua susceptibilidade à lixiviação em ambientes tropicais de textura argilosa (SIQUEIRA, 2019). A matéria orgânica, por sua vez, apresentou dependência espacial moderada nas duas profundidades, coerente com o processo gradual de decomposição da palhada e sua incorporação superficial em áreas sob plantio direto (LOSS, 2015).

De modo geral, a comparação entre as (Tabelas 1 e 2) demonstra que a camada superficial (0–10 cm) apresenta maior homogeneidade e estrutura espacial mais forte, enquanto a camada de 10–20 cm exibe maior variabilidade e dependência espacial predominantemente moderada. As (Figuras 3 e 4) reforçam essa diferença, ao mostrar semivariogramas com alcances mais definidos na camada superior e curvas mais dispersas

na subsuperfície. Essa diferença reflete a interação entre as práticas de manejo conservacionista e os processos naturais do solo, os quais regulam a distribuição dos atributos químicos. Dessa forma, os resultados confirmam a importância da geoestatística como ferramenta essencial para o diagnóstico da variabilidade espacial do solo, permitindo o delineamento de zonas de manejo específicas e o uso racional de corretivos e fertilizantes (EMBRAPA, 2018), contribuindo para a sustentabilidade de sistemas agrícolas sob plantio direto no Cerrado.

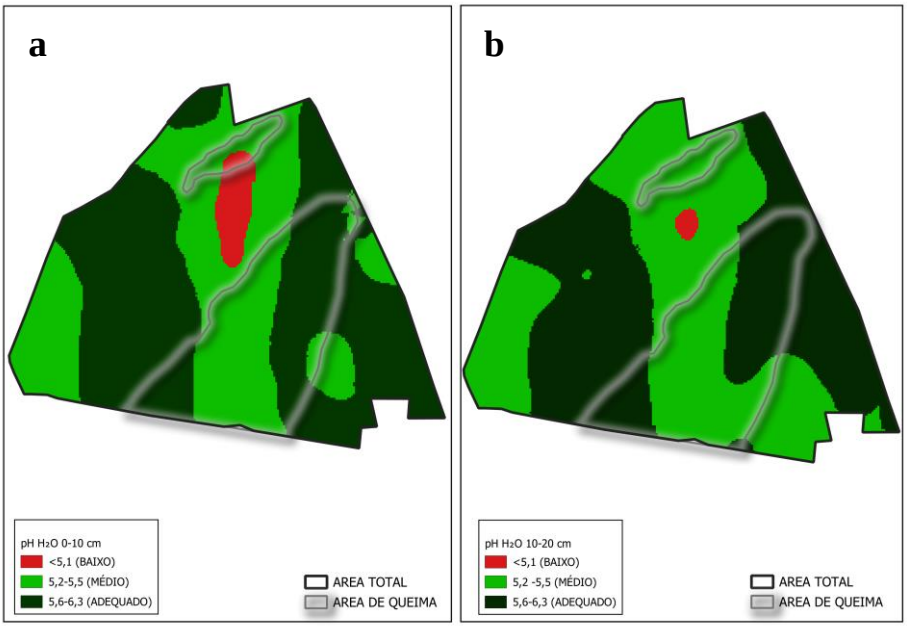
4.2 Interpretação de resultados das análises de solo e mapas temáticos

A distribuição espacial do pH em H_2O apresentou variações entre as profundidades avaliadas, evidenciando a heterogeneidade da acidez do solo na área experimental (Figura 2). Na camada de 0–10 cm, observaram-se regiões com valores intermediários de pH, predominantemente entre 5,2 e 6,3, além de manchas com maior acidez, especialmente na porção central-norte da área (Figura 2a). Conforme os critérios de interpretação apresentados por Sousa et al. (2004), esses valores abrangem diferentes condições de acidez do solo. Parte das regiões com menores valores de pH apresentou sobreposição espacial com o setor atingido pela queima acidental, sugerindo uma possível associação entre o distúrbio e a distribuição da acidez superficial.

A queima de resíduos vegetais pode promover inicialmente uma elevação temporária do pH devido à deposição de cinzas contendo óxidos, hidróxidos, carbonatos e cátions básicos (SILVA et al., 2019). Entretanto, a permanência desse efeito depende da quantidade de cinzas produzidas, das condições de precipitação e dos processos de redistribuição de bases no solo. Assim, a ocorrência de regiões com maior acidez aproximadamente 11 meses após a queima pode refletir tanto as características químicas naturais do Latossolo Vermelho Distroférrico quanto a dinâmica de bases e os possíveis efeitos residuais do fogo. Loss et al. (2015) discutem alterações nas propriedades químicas do solo associadas a distúrbios e práticas de manejo, ressaltando a importância das condições ambientais na interpretação dessas respostas.

Na profundidade de 10–20 cm, a distribuição espacial do pH apresentou menor contraste entre as classes, indicando maior homogeneidade em relação à camada superficial (Figura 2b). Esse comportamento pode estar associado à menor influência direta dos resíduos vegetais e das práticas de manejo superficial, bem como às características mineralógicas responsáveis pelo tamponamento químico do solo. Conforme Embrapa (2018), os Latossolos apresentam elevado grau de intemperismo e propriedades químicas fortemente relacionadas à composição mineralógica da fração argila. Dessa forma, a distribuição espacial do pH sugere que a acidez do solo resulta da interação entre suas características naturais, o histórico de calagem e possíveis alterações associadas à queima, não sendo possível individualizar a contribuição desses fatores apenas pelos mapas de krigagem.

Figura 2. Distribuição espacial do pH do solo (H_2O) na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, com sobreposição das áreas de queima.



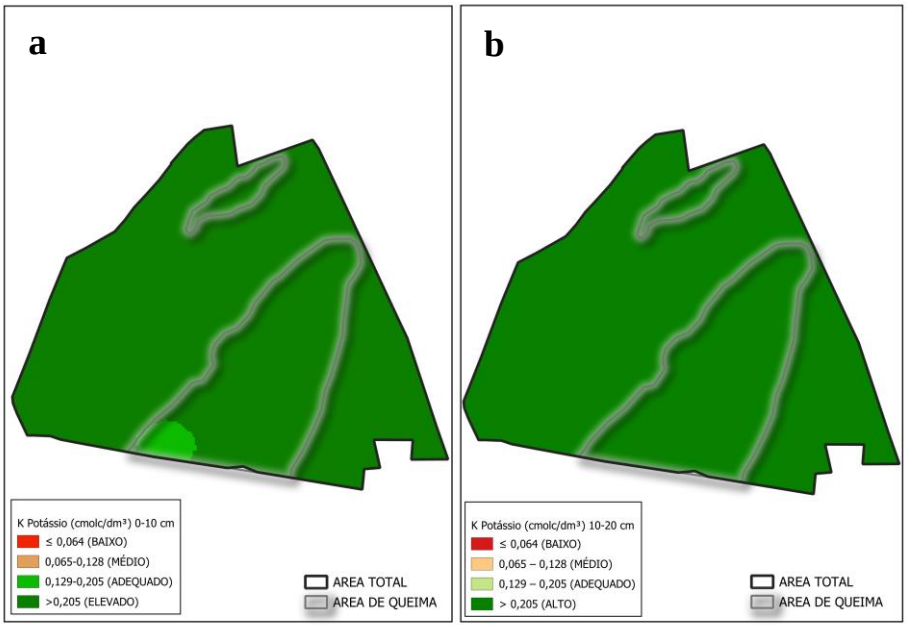
Fonte: Autora (2025)

A distribuição espacial dos teores de potássio (K^+) apresentou heterogeneidade entre as profundidades de 0–10 e 10–20 cm, com predomínio de classes intermediárias e elevadas na maior parte da área experimental (Figura 3). Na camada superficial,

observaram-se regiões com maiores concentrações de K^+ distribuídas de maneira descontínua, indicando variações espaciais na disponibilidade do nutriente (Figura 3a). Na camada de 10–20 cm, verificaram-se alterações na extensão e na localização das classes, evidenciando diferenças na distribuição do potássio ao longo do perfil (Figura 3b).

Esse comportamento pode estar relacionado à ciclagem de nutrientes em sistemas sob plantio direto, nos quais a decomposição dos resíduos vegetais contribui para a liberação e redistribuição do K^+. A disponibilidade desse elemento também depende do histórico de fertilização e das características químicas e mineralógicas do solo, conforme discutido por Sousa et al. (2004). Embora a queima acidental possa modificar temporariamente a disponibilidade de potássio pela deposição de cinzas, a distribuição espacial observada não permite estabelecer uma relação causal direta entre o fogo e as variações identificadas.

Figura 3. Distribuição espacial dos teores de potássio (*K*) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e área total.



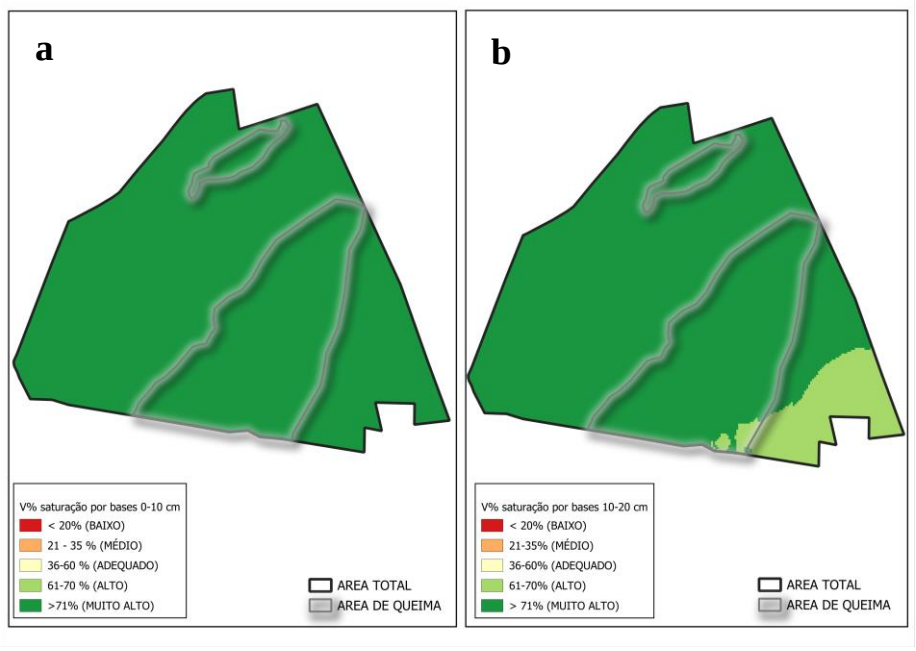
Fonte: Autora (2025)

A saturação por bases (V%) apresentou distribuição espacial relativamente homogênea nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm, com predominância de classes intermediárias a elevadas na área experimental (Figura 4). Na camada superficial,

observou-se ampla continuidade espacial das classes predominantes, com pequenas variações localizadas (Figura 4a). Na profundidade de 10–20 cm, verificou-se comportamento semelhante, embora algumas regiões tenham apresentado menores valores de saturação por bases (Figura 4b).

A predominância dessas classes pode estar associada ao histórico de calagem e à manutenção de cátions básicos no complexo de troca do solo. Segundo Sousa et al. (2004), a saturação por bases constitui um importante indicador da condição de fertilidade e da necessidade de correção da acidez em solos do Cerrado. Em sistemas sob plantio direto consolidado, a aplicação superficial de corretivos e a ciclagem de nutrientes podem contribuir para a formação de gradientes químicos ao longo do perfil. Entretanto, a ausência de contrastes espaciais bem definidos entre os setores com e sem queima sugere que a distribuição do V% não apresentou um padrão visual diretamente associado à ocorrência do fogo.

Figura 4. Distribuição espacial da saturação por bases ($V\%$) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e área total.

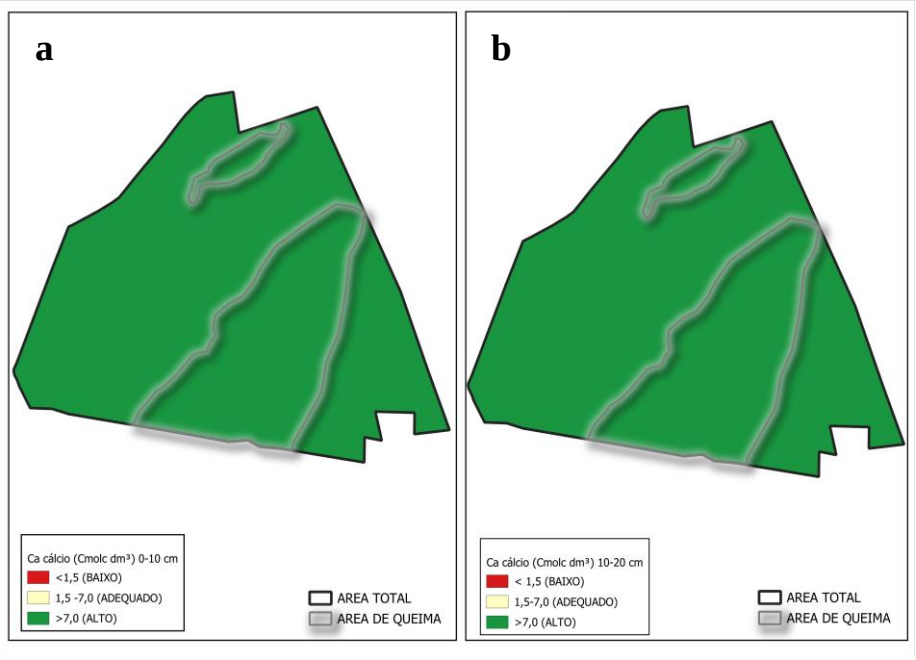


Fonte: Autora (2025)

Os teores de cálcio (Ca^{2+}) apresentaram distribuição espacial predominantemente associada às classes intermediárias e elevadas nas duas profundidades avaliadas (Figura 5). Na camada de 0–10 cm, observou-se relativa continuidade das classes ao longo da área experimental, com pequenas regiões de variação localizada (Figura 5a). Na camada de 10–20 cm, a distribuição apresentou comportamento semelhante, embora com diferenças na extensão das classes, indicando variações na disponibilidade do nutriente ao longo do perfil (Figura 5b).

A manutenção de teores relativamente elevados de cálcio pode estar relacionada ao histórico de aplicação de corretivos agrícolas e à capacidade do solo de reter cátions no complexo de troca. Bortolon et al. (2021) discutem a influência das práticas de manejo da fertilidade sobre a disponibilidade de nutrientes em solos agrícolas. Entretanto, a ocorrência de teores elevados de Ca^{2+} não caracteriza, isoladamente, uma condição de supercalagem, sendo necessária a avaliação conjunta do pH, da saturação por bases e das relações entre os cátions trocáveis. Conforme Almeida et al. (2023), desequilíbrios nas relações catiônicas podem interferir na dinâmica de nutrientes e em determinadas propriedades físico-químicas do solo. Assim, a distribuição espacial do Ca^{2+} parece refletir principalmente a interação entre as características químicas do solo e o histórico de manejo, sem evidências espaciais suficientes para atribuir suas variações diretamente à queima acidental.

Figura 5. Distribuição espacial dos teores de cálcio (Ca) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e área total.

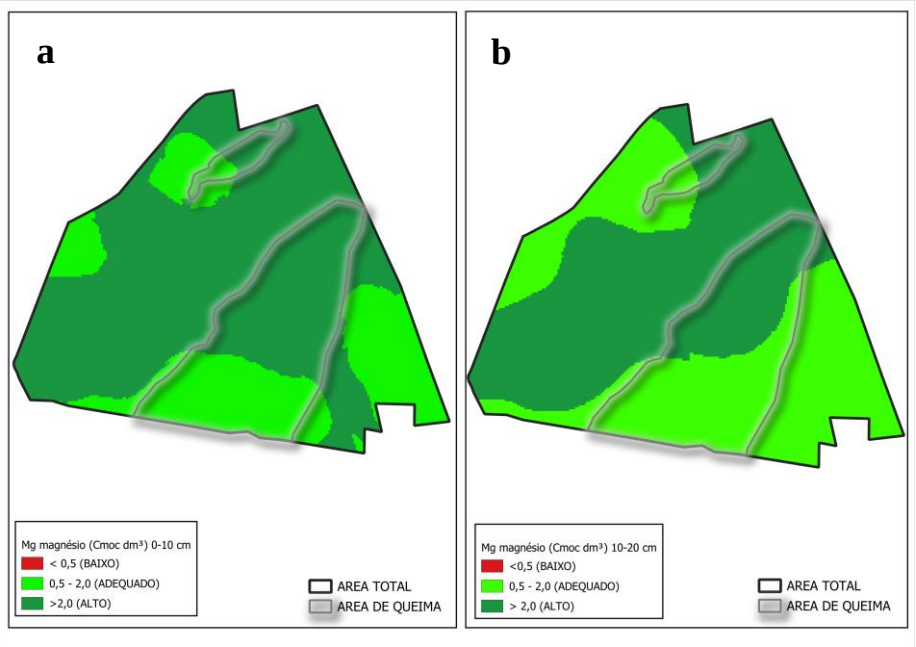


Fonte: Autora (2025)

A distribuição espacial dos teores de magnésio (Mg^{2+}) apresentou relativa homogeneidade nas duas profundidades avaliadas, com predominância de classes intermediárias na maior parte da área experimental (Figura 6). Na camada de 0–10 cm, verificou-se continuidade espacial das classes predominantes, com pequenas regiões de maior disponibilidade do nutriente (Figura 6a). Na profundidade de 10–20 cm, observou-se comportamento semelhante, indicando menor diferenciação espacial do Mg^{2+} em relação a outros atributos químicos avaliados (Figura 6b).

Esse padrão pode estar associado à contribuição residual da calagem e à retenção de Mg^{2+} no complexo de troca, especialmente em solos argilosos submetidos ao manejo contínuo da fertilidade. Bortolon et al. (2021) destacam a importância do histórico de manejo na dinâmica de nutrientes em sistemas agrícolas, enquanto Almeida et al. (2023) discutem a influência das relações catiônicas sobre a disponibilidade de bases no solo. Embora a combustão de resíduos vegetais possa promover alterações temporárias na disponibilidade de Mg^{2+}, os mapas não evidenciam contrastes espaciais suficientemente definidos para relacionar diretamente sua distribuição à ocorrência da queima.

Figura 6. Distribuição espacial dos teores de magnésio (Mg) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e área total**.**



Fonte: Autora (2025)

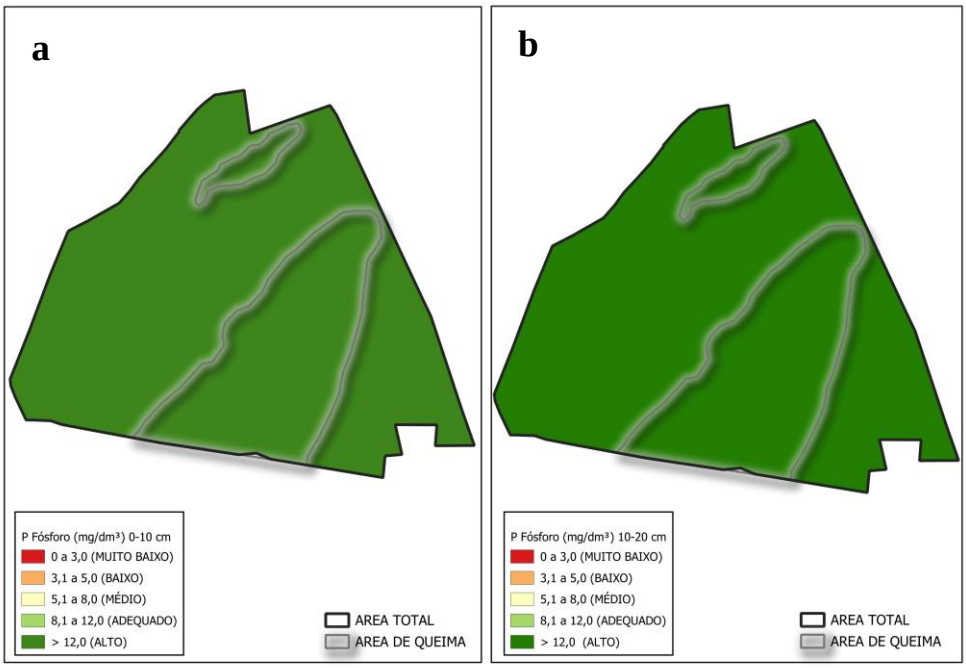
A distribuição espacial dos teores de fósforo disponível (P) apresentou predominância de classes intermediárias e elevadas nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm, com variações localizadas na extensão das classes de disponibilidade (Figura 7). Na camada superficial, observaram-se regiões com maiores concentrações de P distribuídas em setores específicos da área experimental, enquanto outras regiões apresentaram valores relativamente menores (Figura 7a). Na camada de 10–20 cm, a distribuição manteve predomínio de classes semelhantes, embora com alterações na localização e extensão das manchas de maior disponibilidade (Figura 7b).

A manutenção de teores relativamente elevados de fósforo pode estar relacionada ao histórico de adubações fosfatadas sucessivas e à elevada capacidade de retenção desse elemento nos Latossolos Vermelhos Distroférricos. Conforme discutido por Novais et al. (2021), a dinâmica do fósforo em solos tropicais é fortemente influenciada pelas reações de adsorção em minerais da fração argila, especialmente óxidos de ferro e alumínio, que controlam sua disponibilidade e mobilidade. Entretanto, o acúmulo de P disponível não

significa necessariamente saturação dos sítios de adsorção, uma vez que essa condição depende da capacidade de adsorção e do grau de saturação por fósforo do solo.

A distribuição espacial observada também pode refletir a estratificação decorrente da aplicação superficial de fertilizantes e da ciclagem de nutrientes no sistema plantio direto. Embora a queima acidental possa modificar temporariamente a disponibilidade de fósforo pela mineralização de resíduos orgânicos e deposição de cinzas, os mapas não permitem identificar um padrão diretamente atribuível ao fogo. Dessa forma, as variações espaciais devem ser interpretadas considerando o histórico de fertilização e as propriedades mineralógicas que regulam a retenção e a disponibilidade do fósforo.

Figura 7. Distribuição espacial dos teores de fósforo (*P*) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e área total.



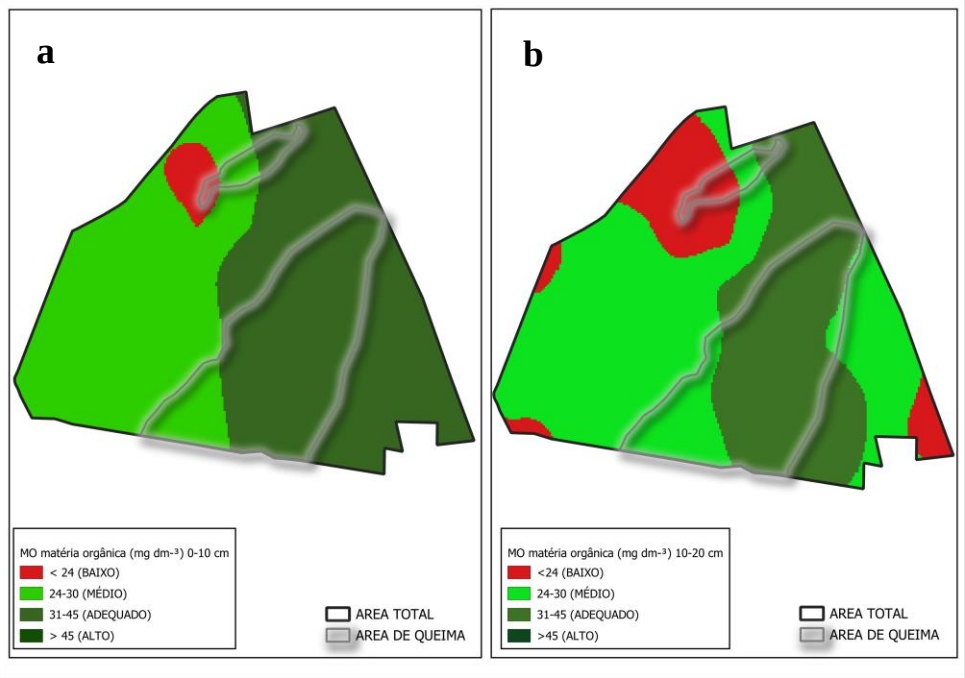
Fonte: Autora (2025)

A distribuição espacial dos teores de matéria orgânica (MO) apresentou heterogeneidade nas duas profundidades avaliadas, com formação de manchas de diferentes classes ao longo da área experimental (Figura 8). Na camada de 0–10 cm, observou-se predominância de classes intermediárias, com regiões localizadas de maiores teores de MO, principalmente na porção superior da área (Figura 8a). Na camada de 10–

20 cm, verificou-se maior contraste espacial entre as classes, incluindo regiões com valores relativamente superiores e inferiores aos predominantes na área (Figura 8b).

A variabilidade espacial da matéria orgânica pode estar associada à distribuição dos resíduos vegetais, ao histórico de manejo e às diferenças locais na produção e decomposição da biomassa. Em sistemas sob plantio direto consolidado, o aporte contínuo de resíduos favorece a manutenção dos estoques de carbono orgânico, especialmente nas camadas superficiais. Conforme discutido por Loss et al. (2015), a dinâmica da matéria orgânica está relacionada às práticas de manejo, à intensidade das perturbações e às condições ambientais que regulam a decomposição e a estabilização dos compostos orgânicos.

Figura 8. Distribuição espacial dos teores de matéria orgânica (MO) no solo na área de estudo: (a) profundidade de 0–10 cm e (b) profundidade de 10–20 cm, em relação às áreas de queima e à área total.



Fonte: Autora (2025)

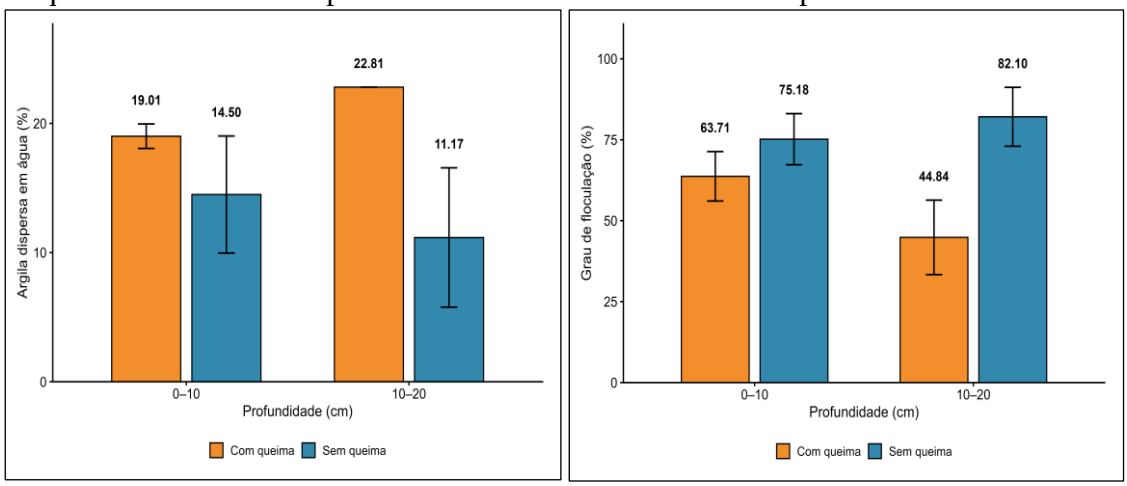
A ocorrência da queima acidental pode ter contribuído para modificações localizadas na quantidade e na qualidade dos resíduos orgânicos, com possíveis reflexos sobre a dinâmica da matéria orgânica. Entretanto, aproximadamente 11 meses após o

evento, a distribuição espacial observada representa a integração de processos de aporte, decomposição e estabilização do carbono, não sendo possível atribuir diretamente as manchas de menores teores à ação do fogo. Dessa forma, os mapas evidenciam a importância da variabilidade espacial da MO para a compreensão das condições químicas e biológicas do solo sob manejo conservacionista.

4.3 Parâmetros físicos do solo

A queima acidental da palhada esteve associada a alterações nos atributos físicos do solo, principalmente na dispersão de argila e no grau de floculação, cujas respostas variaram entre as profundidades avaliadas (Figura 9). Na camada de 0–10 cm, a argila dispersa em água (ADA) apresentou valores médios de 19,01% na área com queima e 14,50% na área sem queima, correspondendo a um incremento de 31,1% na área afetada pelo fogo. Na camada de 10–20 cm, essa diferença foi mais acentuada, com valores de 22,81% e 11,17%, respectivamente, representando um aumento de 104,2% na ADA do solo queimado. Esse comportamento evidencia maior dispersão das partículas de argila na área submetida à queima, especialmente em subsuperfície, sugerindo possíveis alterações nos mecanismos responsáveis pela estabilidade dos coloides do solo.

Figura 9 - Argila dispersa em água (ADA, %) e grau de floculação (GF, %) em função da queima acidental e da profundidade do solo sob sistema de plantio direto.



Fonte: (Autora, 2025)

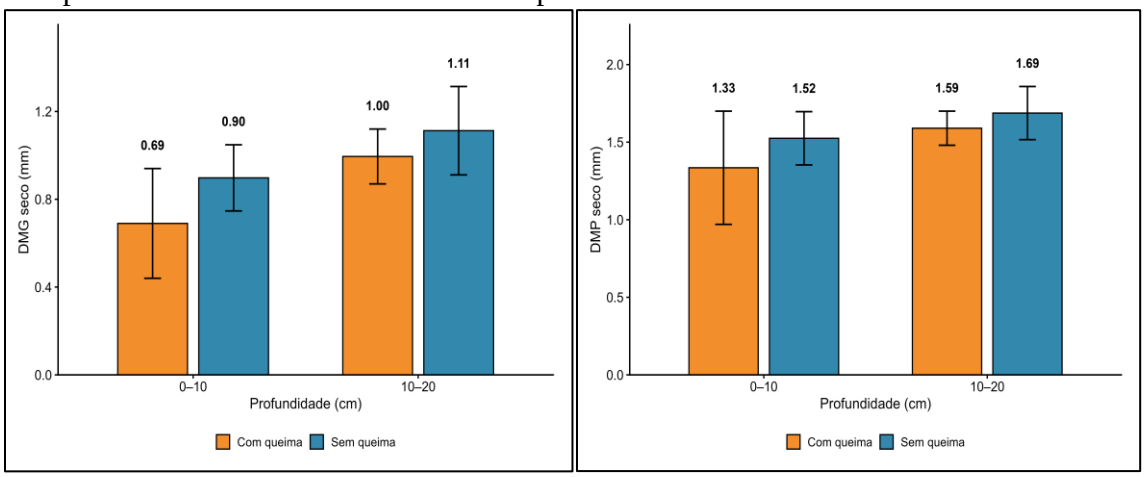
O aumento da ADA na área queimada pode estar relacionado à degradação de compostos orgânicos que atuam na estabilização das partículas minerais, reduzindo a ação de agentes cimentantes e favorecendo a dispersão da fração argila. Mataix-Solera et al. (2011) destacam que a resposta estrutural do solo ao fogo depende da temperatura atingida, da duração do aquecimento e das características mineralógicas e orgânicas do solo. Entretanto, considerando que o calor proveniente de queimadas superficiais tende a apresentar atenuação com a profundidade, a maior diferença observada na camada de 10–20 cm não pode ser atribuída exclusivamente à ação térmica direta. Esse comportamento também pode refletir a variabilidade espacial dos atributos físicos, a distribuição da matéria orgânica e as condições químicas que regulam a dispersão e a floculação das partículas.

O grau de floculação (GF) apresentou comportamento inverso ao da ADA, com maiores valores nas áreas sem queima em ambas as profundidades (Figura 9). Na camada de 0–10 cm, o GF foi de 75,18% na área sem queima e 63,71% na área queimada, representando uma redução relativa de 15,3% no solo afetado pelo fogo. Na camada de 10–20 cm, os valores foram de 82,10% e 44,84%, respectivamente, correspondendo a uma redução de 45,4%. A maior floculação observada nas áreas sem queima indica menor proporção de argila dispersa em relação à argila total, condição favorável à organização estrutural do solo. Em contrapartida, os menores valores de GF nas áreas queimadas sugerem maior suscetibilidade à dispersão coloidal, especialmente em subsuperfície. Essa resposta pode estar associada à menor contribuição de agentes orgânicos estabilizadores e às interações entre partículas de argila, matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio, componentes importantes na organização estrutural dos Latossolos.

Apesar das diferenças observadas na ADA e no GF, os indicadores de estabilidade dos agregados determinados pelo peneiramento via seca apresentaram variações menos expressivas entre as áreas com e sem queima (Figura 10). Na camada de 0–10 cm, o diâmetro médio geométrico (DMG) foi de 0,69 mm na área queimada e 0,90 mm na área sem queima, correspondendo a uma redução de 23,3% no solo afetado pelo fogo. Na camada de 10–20 cm, entretanto, o comportamento foi inverso, com valores de 1,00 mm na área queimada e 1,11 mm na área sem queima, representando uma redução de 9,9%. O diâmetro médio ponderado (DMP) apresentou valores de 1,33 e 1,52 mm na

camada superficial, respectivamente, enquanto na camada de 10–20 cm foram observados 1,59 e 1,69 mm, correspondendo a reduções de 12,5% e 5,9% nas áreas queimadas.

Figura 10 - diâmetro médio geométrico (DMG) e do diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados do solo determinado pelo metodo via seca em função da queima acidental e da profundidade do solo sob sistema de plantio direto.



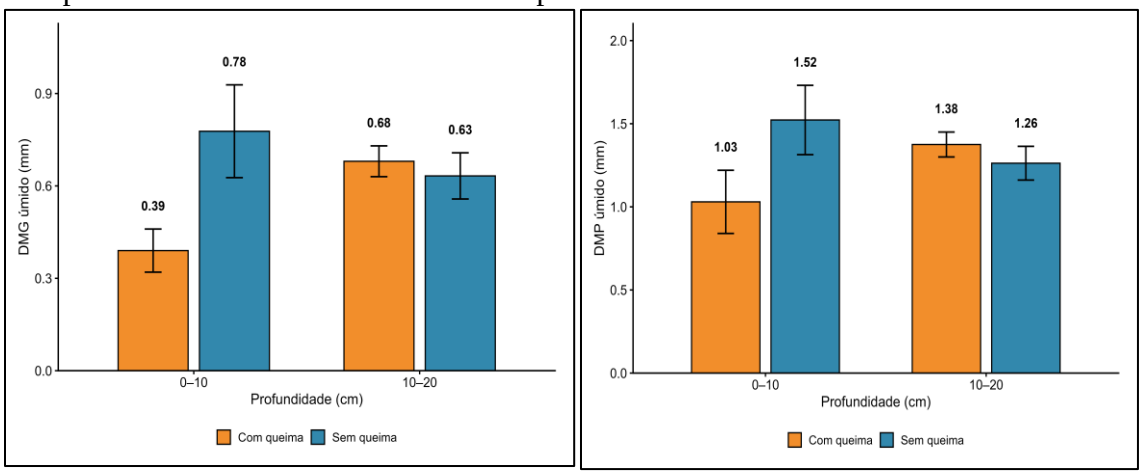
Fonte: (Autora, 2025)

Os maiores valores de DMG e DMP obtidos pelo método via seca nas áreas sem queima indicam maior participação de agregados de maiores dimensões, sobretudo na camada superficial. Essa resposta pode estar relacionada à manutenção dos resíduos vegetais e à contribuição da matéria orgânica na formação e estabilização dos agregados. Em sistemas sob plantio direto consolidado, o aporte contínuo de resíduos e a ausência de revolvimento favorecem a preservação das interações entre partículas minerais e compostos orgânicos, contribuindo para a organização estrutural do solo. Entretanto, a proximidade entre os valores observados nas áreas com e sem queima, principalmente em subsuperfície, sugere que a distribuição dos agregados resistentes ao peneiramento seco apresentou menor contraste entre os tratamentos do que os atributos relacionados à dispersão e floculação da argila.

A estabilidade dos agregados determinada pelo peneiramento via úmida apresentou comportamento distinto daquele observado pelo método via seca, principalmente na camada superficial (Figura 11). Na profundidade de 0–10 cm, o DMG foi de 0,39 mm na área com queima e 0,78 mm na área sem queima, representando uma redução de 50,0% no solo queimado. O DMP apresentou comportamento semelhante,

com valores de 1,03 e 1,52 mm, respectivamente, correspondendo a uma redução de 32,2%. Na camada de 10–20 cm, entretanto, os valores foram mais próximos, com DMG de 0,68 mm na área queimada e 0,63 mm na área sem queima, enquanto o DMP foi de 1,38 e 1,26 mm, respectivamente. Esses resultados evidenciam que as maiores diferenças na estabilidade hídrica dos agregados ocorreram na camada superficial, enquanto em subsuperfície os valores médios foram ligeiramente superiores na área queimada.

Figura 11 - diâmetro médio geométrico (DMG) e do diâmetro médio ponderado (DMP) de agregados do solo determinado pelo metodo via umido em função da queima acidental e da profundidade do solo sob sistema de plantio direto.



Fonte: (Autora, 2025)

A menor estabilidade dos agregados em água observada na camada superficial da área queimada pode estar associada à alteração de agentes cimentantes orgânicos responsáveis pela resistência dos agregados à desagregação durante o umedecimento. Diferentemente do peneiramento via seca, que caracteriza a distribuição dos agregados resistentes à fragmentação mecânica, o método via úmida permite avaliar sua resistência à ação da água, incluindo processos de desagregação associados ao umedecimento rápido e à perda de coesão entre partículas. Dessa forma, a maior redução proporcional do DMG e do DMP via úmida na camada de 0–10 cm sugere que a estabilidade hídrica dos agregados apresentou maior contraste entre as áreas com e sem queima do que a estabilidade avaliada pelo método via seca.

A comparação entre os métodos também evidenciou que os valores de DMG e DMP obtidos via seca foram, em geral, superiores aos determinados via úmida, indicando

que parte dos agregados resistentes ao peneiramento mecânico apresentou menor resistência à ação da água. Esse comportamento é compatível com a participação de compostos orgânicos e interações organominerais na estabilização dos agregados, especialmente em solos altamente intemperizados, nos quais os óxidos de ferro e alumínio também desempenham importante função cimentante. Assim, as diferenças entre os métodos demonstram a importância de avaliar conjuntamente a distribuição dos agregados secos e sua estabilidade em água, uma vez que representam propriedades complementares da organização estrutural do solo.

De maneira integrada, os resultados indicam que a área submetida à queima apresentou maiores valores de argila dispersa em água e menores graus de floculação nas duas profundidades, enquanto as maiores reduções nos indicadores de estabilidade dos agregados em água ocorreram na camada de 0–10 cm. Esse conjunto de respostas sugere que os atributos relacionados à dispersão coloidal e à resistência dos agregados ao umedecimento podem apresentar sensibilidades distintas às condições do solo após a queima acidental. Entretanto, considerando a natureza observacional da comparação e a variabilidade entre os pontos amostrais, não é possível atribuir exclusivamente ao fogo as diferenças registradas. A manutenção do sistema plantio direto consolidado pode ter contribuído para a conservação de parte da estrutura do solo, mas a confirmação de sua capacidade de recuperação física exige avaliações temporais e análises complementares dos mecanismos envolvidos.

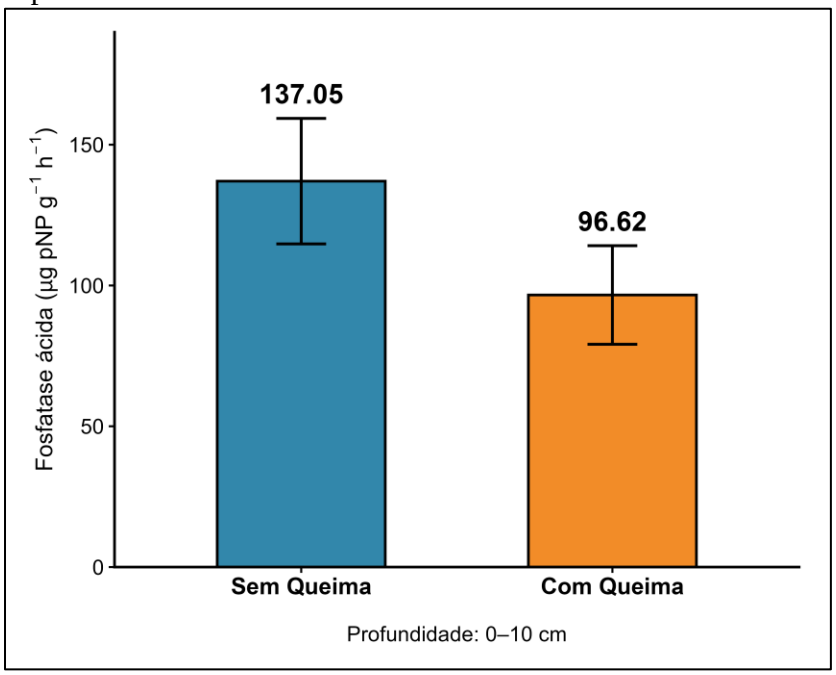
4.4 Parâmetro enzimático

A atividade da fosfatase ácida na camada de 0–10 cm apresentou valores médios de 137,05 μg pNP g^{-1} h^{-1} na área sem queima e 96,62 μg pNP g^{-1} h^{-1} na área submetida à queima acidental, correspondendo a uma redução de aproximadamente 29,5% na atividade enzimática do solo queimado (Figura 12). Esse comportamento evidencia uma menor atividade média da fosfatase ácida na área afetada pela queima, sugerindo possíveis alterações nos processos biológicos relacionados à mineralização do fósforo orgânico. Entretanto, como não foi realizada comparação estatística entre as médias, essa diferença

deve ser interpretada exclusivamente em termos descritivos, não sendo possível afirmar que a queima promoveu redução estatisticamente significativa da atividade enzimática.

A menor media da fosfatase ácida observada na área queimada pode estar relacionada às alterações provocadas pela combustão dos resíduos vegetais sobre os processos biológicos do solo. A exposição ao calor, a redução da disponibilidade de substratos orgânicos e possíveis alterações na biomassa microbiana podem comprometer temporariamente a produção e a persistência de enzimas extracelulares envolvidas na ciclagem do fósforo. Nesse contexto, Zhou et al. (2022), em uma metanálise envolvendo 301 estudos, observaram que os efeitos do fogo sobre a atividade enzimática dependem da severidade da queima, das condições ambientais e do intervalo decorrido entre o distúrbio e a avaliação do solo. De maneira semelhante, Pei et al. (2023) destacaram que alterações na atividade de enzimas relacionadas ao ciclo do fósforo podem estar associadas às modificações na comunidade microbiana e na disponibilidade de matéria orgânica após eventos de queima.

Figura 12 – Atividade da fosfatase ácida (µg p-nitrofenol mL^{-1}) em função da queima acidental sob sistema de plantio direto na profundidade de 0–10 cm.



Fonte: (Autora,2025)

A fosfatase ácida desempenha papel fundamental na mineralização de compostos orgânicos fosfatados, contribuindo para a liberação de fósforo inorgânico potencialmente disponível às plantas (TABATABAI; BREMNER, 1969). Dessa forma, a redução numérica de sua atividade na área queimada pode representar uma resposta residual dos processos biológicos do solo ao distúrbio térmico. Entretanto, considerando a ausência de diferença estatística, essa interpretação deve ser tratada como uma possível tendência, não sendo possível estabelecer uma relação causal direta entre a ocorrência da queima e a diminuição da atividade enzimática.

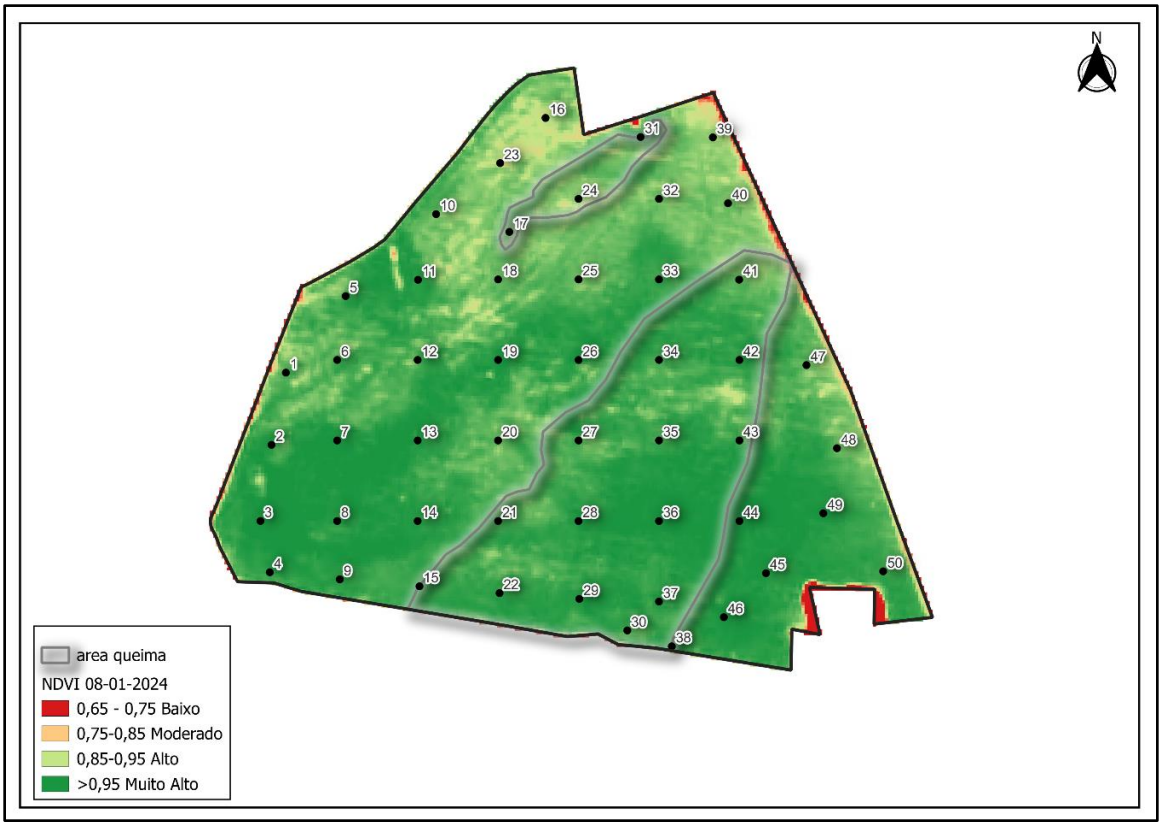
Por outro lado, a maior atividade média observada na área sem queima pode estar associada à manutenção da cobertura vegetal e ao acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do solo, características do sistema plantio direto consolidado. A permanência desses resíduos favorece a conservação da umidade, a regulação da temperatura e o fornecimento contínuo de substratos para a atividade microbiana, criando condições favoráveis à produção e à estabilização de enzimas extracelulares (MATHEW et al., 2012; BOWLES et al., 2014). Assim, embora os tratamentos não tenham diferido estatisticamente, os resultados sugerem que a manutenção da palhada pode contribuir para a conservação dos processos biológicos relacionados à ciclagem do fósforo, enquanto a ausência de diferença significativa entre as áreas indica que não foi detectado comprometimento persistente da atividade da fosfatase ácida no momento da avaliação.

4.5 Dinâmica temporal do NDVI

A análise multitemporal do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) permitiu caracterizar as condições da cobertura vegetal da área experimental antes e após a ocorrência da queima acidental, fornecendo informações sobre a resposta espectral da vegetação ao longo do período avaliado. O NDVI constitui um dos índices mais utilizados em estudos de sensoriamento remoto, devido à sua sensibilidade às variações na biomassa verde, na atividade fotossintética e na densidade da cobertura vegetal, sendo empregado no monitoramento do desenvolvimento das culturas e na identificação de alterações decorrentes de estresses ambientais (XUE; SU, 2017; YAN et al., 2025).

A imagem obtida em 08 de janeiro de 2024, período anterior à ocorrência da queima (Figura 13), apresentou predominância das classes Alto e Muito Alto, indicando elevada atividade fotossintética e distribuição relativamente homogênea da cobertura vegetal na área experimental. Esse comportamento é compatível com o desenvolvimento da cultura da soja nos estádios vegetativos V4 e V5, caracterizados pela expansão foliar e pelo aumento da interceptação da radiação solar. Em sistemas conduzidos sob plantio direto, a manutenção de resíduos culturais contribui para a conservação da umidade, a redução das oscilações térmicas e a melhoria das condições de desenvolvimento das plantas (LAL, 2020; MATYUKIRA et al., 2024).

Figura 13 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da área experimental em 08 de janeiro de 2024, evidenciando a recuperação da cobertura vegetal após a queima acidental.

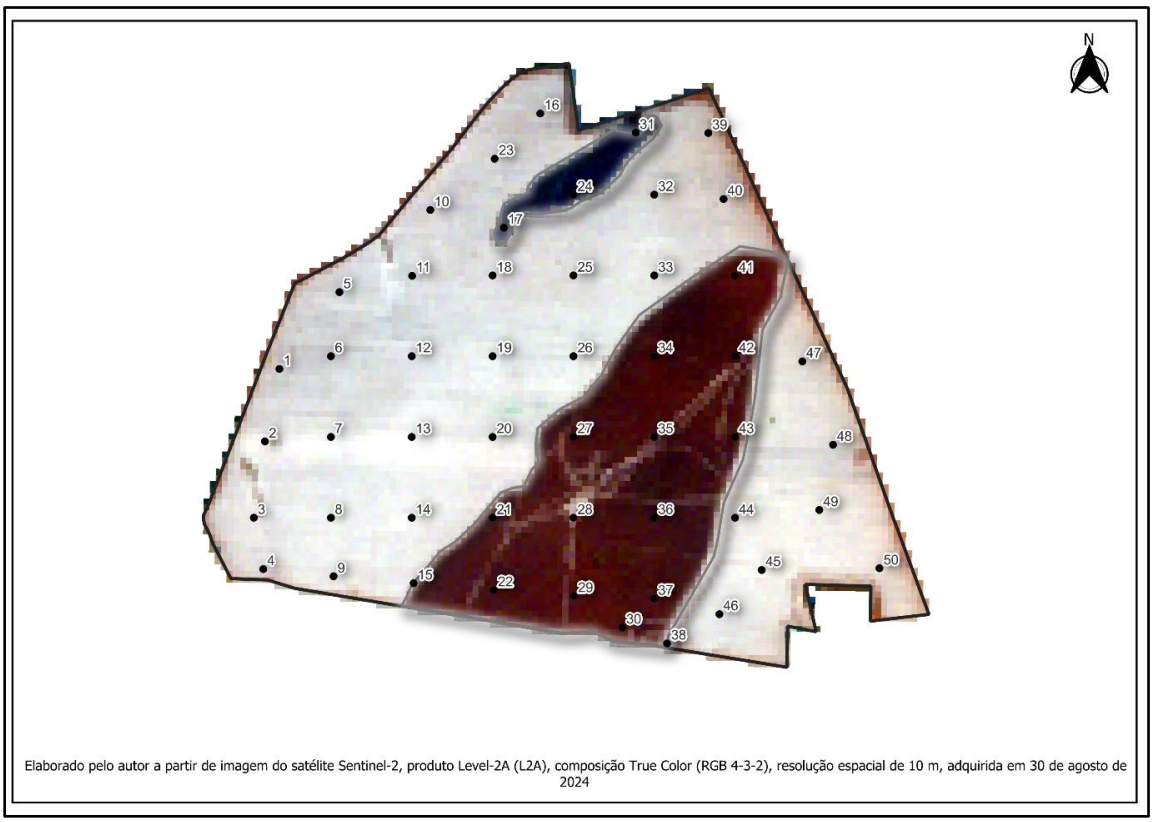


Fonte: Autora (2025)

A queima acidental ocorreu em agosto de 2024, quando a área experimental se encontrava em pousio, apresentando palhada remanescente da cultura do milho. A imagem

Sentinel-2 adquirida em 30 de agosto de 2024 permitiu delimitar espacialmente a área atingida pelo incêndio (Figura 14). Como não havia cultura em desenvolvimento no momento do evento, a combustão atingiu predominantemente os resíduos vegetais depositados sobre a superfície do solo. A remoção dessa cobertura pode aumentar temporariamente a exposição do solo à radiação solar, ao impacto das gotas de chuva e às perdas de água por evaporação. Entretanto, a intensidade dessas alterações depende das características do fogo, da quantidade de resíduos consumidos e das condições ambientais. Certini (2005) destaca que os efeitos do fogo sobre os atributos do solo são condicionados principalmente pela intensidade e duração do aquecimento, podendo variar desde alterações superficiais até modificações mais persistentes nas propriedades edáficas.

Figura 14 – Delimitação da área atingida pela queima acidental a partir de imagem Sentinel-2 (composição True Color RGB 4-3-2), adquirida em 30 de agosto de 2024.



Fonte: Autora (2025)

A imagem de 18 de dezembro de 2024 (Figura 15) apresentou novamente predominância das classes Alto e Muito Alto, indicando elevada atividade fotossintética e

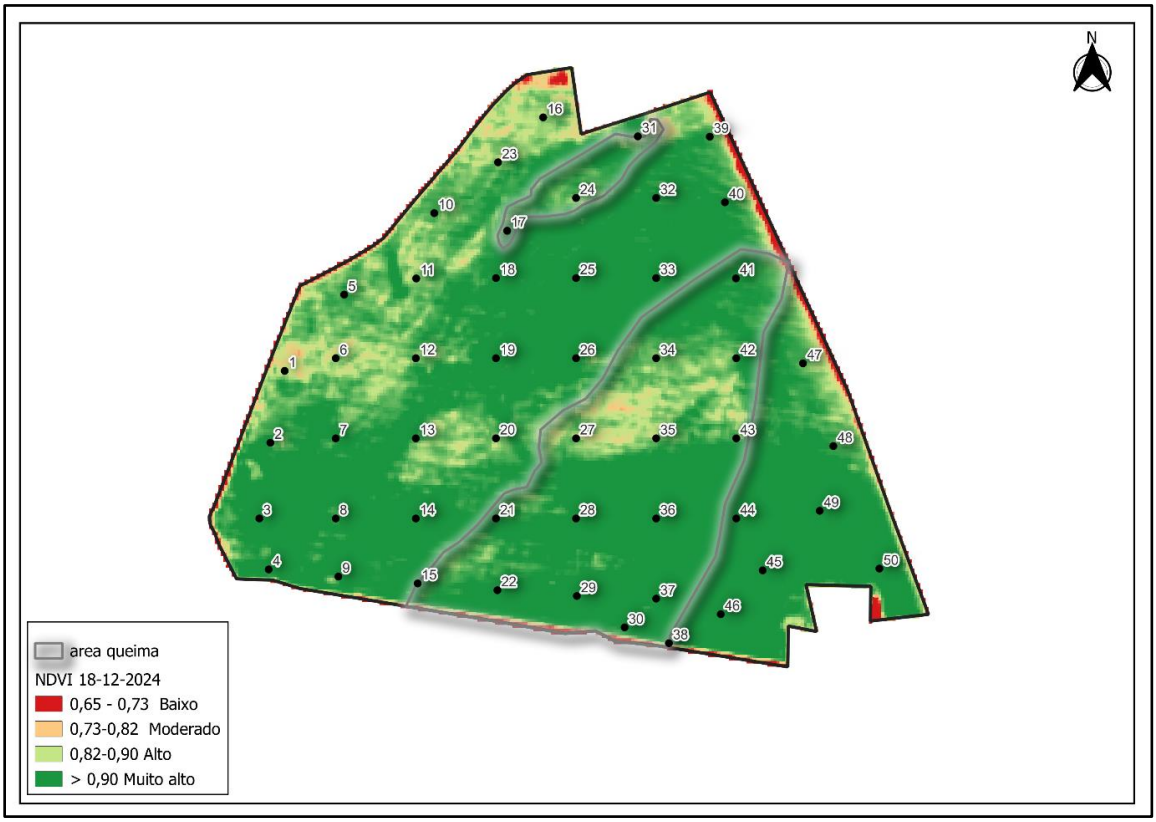
cobertura vegetal após o estabelecimento da cultura subsequente. A distribuição espacial relativamente homogênea dos valores de NDVI sugere que a área anteriormente atingida pela queima apresentava condições favoráveis ao desenvolvimento da vegetação naquele momento. Entretanto, como não foram realizadas avaliações contínuas da vegetação durante todo o intervalo, esses resultados não permitem determinar a velocidade de recuperação nem comprovar a ausência de efeitos do incêndio sobre o desenvolvimento da cultura. Estudos com séries temporais de imagens Sentinel-2 demonstram a aplicabilidade dos índices espectrais na identificação de alterações da cobertura vegetal e no acompanhamento de sua dinâmica após eventos de estresse (ZHANG et al., 2023; YAN et al., 2025).

O histórico de manejo sob sistema plantio direto constitui um aspecto relevante para a interpretação desses resultados. A ausência de revolvimento do solo e a manutenção de resíduos culturais ao longo dos ciclos produtivos podem favorecer a conservação da matéria orgânica, a estabilidade estrutural e a disponibilidade de água, proporcionando condições adequadas ao estabelecimento das culturas. Lal (2020) destaca que práticas conservacionistas contribuem para a manutenção das funções do solo e para a capacidade dos agroecossistemas de responder a perturbações ambientais. Nesse contexto, o manejo adotado na área experimental pode ter contribuído para a manutenção de condições favoráveis ao desenvolvimento da cultura após a queima, embora sua contribuição específica não possa ser isolada a partir das imagens de NDVI.

A interpretação conjunta do monitoramento espectral e das análises físicas, químicas e biológicas do solo deve considerar os diferentes períodos de avaliação. Enquanto as imagens de janeiro e dezembro de 2024 caracterizaram a cobertura vegetal antes e após a ocorrência do incêndio, respectivamente, as amostras de solo foram coletadas em julho de 2025, aproximadamente onze meses após a queima. Assim, a elevada cobertura vegetal observada em dezembro de 2024 e a ausência de diferenças significativas para determinados atributos do solo em julho de 2025 representam respostas observadas em momentos distintos. Embora esses resultados sejam compatíveis com a manutenção de determinadas condições funcionais do sistema agrícola, não permitem estabelecer uma relação causal direta entre a recomposição da vegetação e a recuperação dos atributos

edáficos. Daunoras et al. (2024) ressaltam a importância das condições do solo e das interações biológicas para a manutenção de suas funções, evidenciando a complexidade dos processos envolvidos na resposta dos agroecossistemas às perturbações ambientais.

Figura 15 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) da área experimental em 18 de dezembro de 2024, evidenciando a recuperação da cobertura vegetal após a queima acidental.



Fonte: Autora (2025)

De forma geral, a análise multitemporal do NDVI evidenciou elevada cobertura vegetal antes da queima e novamente após o estabelecimento da cultura subsequente. A ocorrência do incêndio durante o período de pousio, com presença predominante de palhada de milho, indica que o evento atingiu principalmente os resíduos vegetais superficiais, sem ocasionar danos diretos a uma cultura em desenvolvimento naquele momento. A resposta espectral observada em dezembro de 2024 sugere a manutenção de condições favoráveis ao crescimento vegetal após o incêndio. Entretanto, a ausência de

uma série temporal mais detalhada e de avaliações do solo imediatamente após a queima limita conclusões sobre a intensidade dos impactos iniciais e a velocidade de recuperação do sistema. Dessa forma, os resultados destacam a importância do monitoramento integrado da vegetação e dos atributos do solo para compreender os efeitos de queimadas acidentais em áreas agrícolas sob manejo conservacionista.

5 CONCLUSÕES

A análise geoestatística evidenciou dependência espacial dos atributos químicos do solo, com destaque para o pH e o fósforo na camada de 0–10 cm, que apresentaram forte dependência espacial. A distribuição dos nutrientes variou entre as profundidades, refletindo a influência das características naturais do solo e do histórico de manejo, sem evidências espaciais suficientes para atribuir diretamente essas variações à queima acidental.

As áreas submetidas à queima apresentaram maiores valores de argila dispersa em água e menores graus de floculação, especialmente na camada de 10–20 cm. Na camada superficial, observaram-se reduções numéricas de 50,0% no diâmetro médio geométrico dos agregados via úmida e de 29,5% na atividade da fosfatase ácida, sugerindo possíveis alterações na estabilidade estrutural e nos processos biológicos relacionados à ciclagem do fósforo.

O monitoramento multitemporal do NDVI evidenciou elevada cobertura vegetal após o estabelecimento da cultura subsequente à queima, indicando condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal. De modo geral, os resultados sugerem que o sistema plantio direto consolidado pode ter contribuído para a manutenção de funções do solo, embora as diferenças observadas não permitam confirmar os efeitos exclusivos da queima ou a recuperação integral de seus atributos físicos, químicos e biológicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry. London: Academic Press, 1995. 576 p.

AGBESHIE, A. A.; ABUGRE, S.; ATTA-DARKWA, T.; AWUAH, R. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, v. 33, n. 5, p. 1419-1441, 2022. DOI: 10.1007/s11676-022-01475-4.

AGBESHIE, A. A. et al. A review of the effects of forest fire on soil properties. *Journal of Forestry Research*, v. 33, p. 1419–1441, 2022.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego: Academic Press, 1995.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALCAÑIZ, M. et al. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest. Science of the Total Environment, v. 572, p. 1329–1335, 2016. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.01.115.

ARUNRAT, N. et al. Fire impacts on soil properties and implications for rotational shifting cultivation: A review. Agriculture, v. 14, n. 9, 2024.

BASTOS, R. S. et al. Formação e estabilização de agregados do solo decorrentes da adição de compostos orgânicos com diferentes características hidrofóbicas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 11–20, 2005.

BARREIRO, A.; DÍAZ-RAVIÑA, M. Fire impacts on soil microorganisms: mass, activity, and diversity. Current Opinion in Environmental Science & Health, v. 22, p. 100264, 2021.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J. C.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. Soil and Tillage Research, v. 54, p. 101-109, 2000.

BODÍ, M. B. et al. Wildland fire ash: production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. Earth-Science Reviews, v. 130, p. 103-127, 2014.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade estrutural de Latossolos Roxos submetidos a diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 14, p. 99–105, 1990

CERTINI, G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. Oecologia, v. 143, n. 1, p. 1–10, 2005.

DELEGIDO, J.; VERRELST, J.; ALONSO, L.; MORENO, J. Evaluation of Sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. *Sensors*, Basel, v. 11, n. 7, p. 7063–7081, 2011.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; LI, H. W. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2010.

DOOLEY, S. R.; TRESEDER, K. K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies. Biogeochemistry, v. 109, p. 49–61, 2012.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

FIETZ, C. R.; FISCH, G. O clima da região de Dourados, MS. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2008. (Circular Técnica, 22).

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. Revista Brasileira de Biometria, Lavras, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: 10.28951/rbb.v37i4.450

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1989.

LOSS, A. et al. Atributos físicos e carbono orgânico de Latossolo sob plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 3, p. 940–953, 2015.

MATAIX-SOLERA, J.; CERDÀ, A.; ARCENEGUI, V.; JORDÁN, A.; ZAVALA, L. M. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, v. 109, p. 44–60, 2011.

MATAIX-SOLERA, J. et al. Fire effects on soil aggregation: a review. Earth-Science Reviews, v. 109, p. 44–60, 2011.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. 3. ed. Lavras: UFLA, 2021.

MOLIN, J. P.; CASTRO, C. N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties. Scientia Agricola, v. 65, n. 4, p. 319-326, 2008.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

NOVAIS, R. F. et al. (ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007.

NARDOTO, G. B.; BUSTAMANTE, M. M. C. Effects of fire on soil nitrogen dynamics and microbial biomass in a Brazilian Cerrado. Plant and Soil, v. 252, p. 155-163, 2003.

PEREIRA, G. W. et al. Smart-Map: An Open-Source QGIS Plugin for Digital Mapping Using Machine Learning Techniques and Ordinary Kriging. *Agronomy*, v. 12, n. 6, art. 1350, 2022.

PEREIRA, P. et al. Short-term vegetation recovery after a grassland fire in Lithuania. Flora, v. 209, p. 11–17, 2014.

PELLEGRINI, A. F. A.; JACKSON, R. B. The long and short of it: a review of the timescales of how fire affects soils using the pulse-press framework. Advances in Ecological Research, v. 62, p. 147–171, 2020.

PRESSLER, Y.; MOORE, J. C.; COTRUFO, M. F. Belowground community responses to fire: meta-analysis reveals contrasting responses of soil microorganisms and mesofauna. Oikos, v. 128, n. 3, p. 309–327, 2019.

REDIN, M.; SANTOS, G. F.; MIGLIAVACCA, F. A.; DENARDIN, R. B.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Impactos da queima sobre atributos químicos, biológicos e microbiológicos do solo. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F.; KER, J. C. Pedologia: base para distinção de ambientes. 6. ed. Lavras: UFLA, 2014. 378 p.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3., 1973, Washington. *Proceedings*... Washington: NASA, 1974. p. 309–317.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da dispersão da amostra. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 29, p. 297-300, 2005.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J. Alterações de atributos químicos do solo decorrentes da queima de resíduos vegetais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 2003.

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 389-400, 2000.

SANTOS, H. G. et al. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília: Embrapa, 2014.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. *Correção do solo e adubação para culturas anuais dos Cerrados*. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004.

SOUZA, D. M. G. et al. *Fósforo no solo e planta em sistemas de produção no Cerrado*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2006.

SHAKESBY, R. A.; DOERR, S. H. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. Earth-Science Reviews, 2006.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 1, n. 4, p. 301–307, 1969.

TEIXEIRA, P. C. et al. (org.). *Manual de métodos de análise de solo*. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, v. 33, p. 141-163, 1982.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, v. 38, p. 45–94, 1985.

UTOBO, E. B.; TEWARI, L. Soil enzymes as bioindicators of soil ecosystem status. *Applied Ecology and Environmental Research*, v. 13, n. 1, p. 147–169, 2015.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (org.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: SBCS, 2000. p. 1–54.

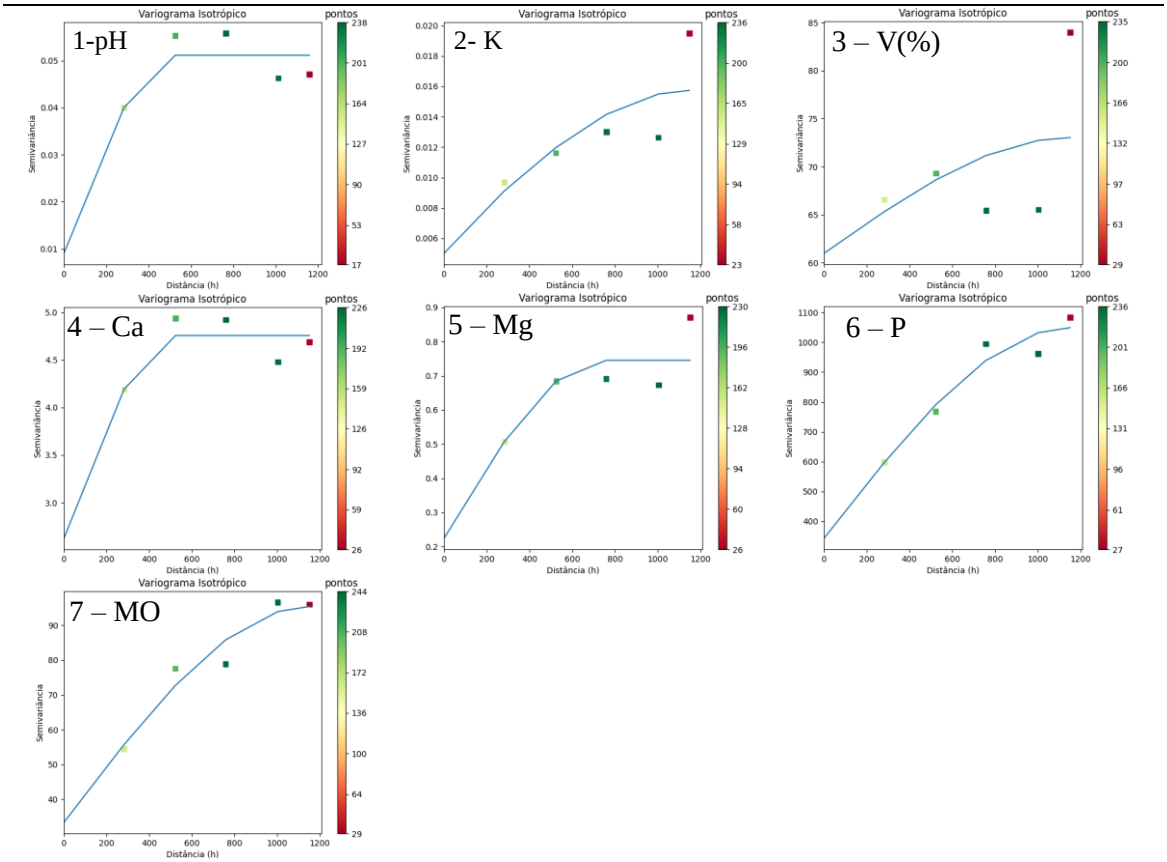
WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. Geostatistics for Environmental Scientists. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007

XUE, J.; SU, B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors*, v. 2017, Article ID 1353691, p. 1–17, 2017.

YAN, K. et al. A global systematic review of remote sensing vegetation indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 139, p. 104560, 2025.

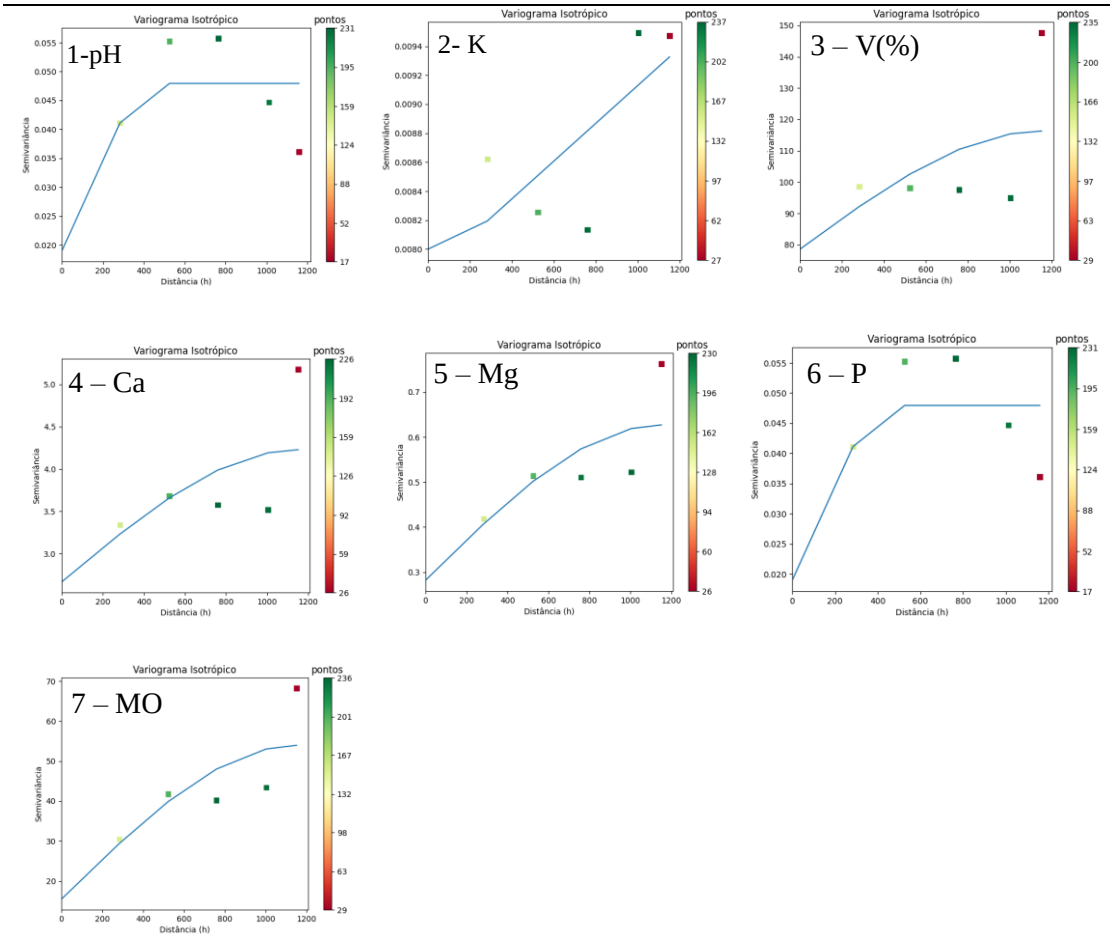
7 Apendice

Figura 16 – Semivariogramas isotrópicos dos atributos químicos do solo na profundidade de 0–10 cm, 1.pH (H_2O); 2. K (cmolc dm^{-3}); 3. V (%); 4. Ca (cmolc dm^{-3}); 5. Mg (cmolc dm^{-3}); 6. P (mg dm^{-3}); 7. MO (g dm^{-3}).



Fonte: (Autora,2025)

Figura 16 – Semivariogramas isotrópicos dos atributos químicos do solo na profundidade de 0–10 cm, 1. pH (H_2O); 2. K (cmolc dm^{-3}); 3. V (%); 4. Ca (cmolc dm^{-3}); 5. Mg (cmolc dm^{-3}); 6. P (mg dm^{-3}); 7. MO (g dm^{-3}).



Fonte: (Autora,2025)